

C.A. Coulomb (クーロン)

あ ぼ ひ お
網 干 壽 夫*

1. ま え が き

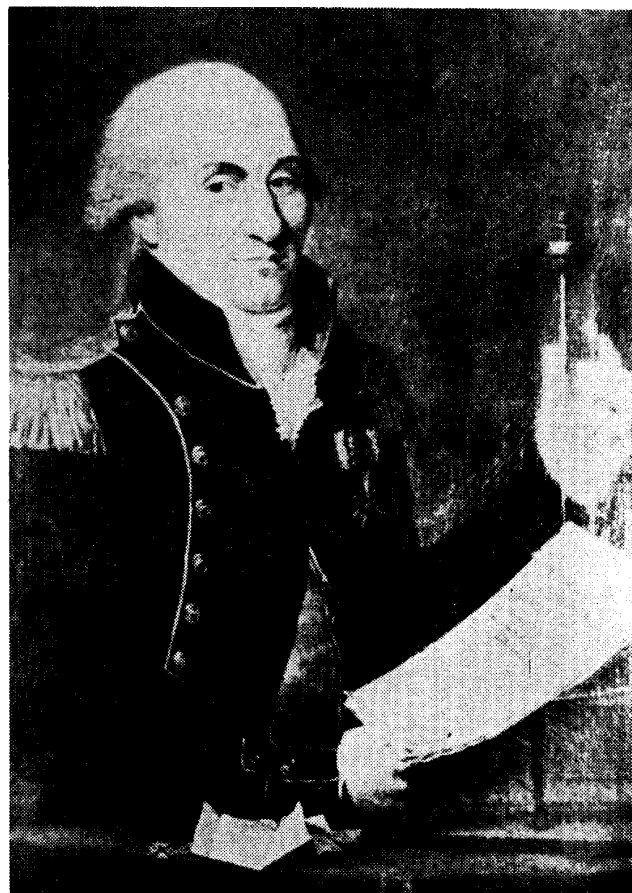
Coulomb といえば, Terzaghi とともに, 土質力学の中で最も著名な学者として広く知られ, 親しまれているビック・ネームであろう。その Coulomb の伝記や業績について紹介する機会を与えられたことは, 筆者にとって身にあまる光栄と感じるとともに, この偉大な先達について, 誤りなく書きしるすことが出来るだろうかと危ぶむものである。

いまさら言うまでもなく, Coulomb は近代科学の黎明期に, 物理学の基礎を固めた, 18世紀最大の科学者であるのみならず, これまで経験に基づいてすすめられてきた“技術”を“工学”の域に高めた, 初めての技術者でもある。その活躍の範囲が広い分野にわたっているだけでなく, かの土圧論もそうであるが, 広い分野での業績が, いずれも 200 年たった今日でも, そのままの形で生き続けているという, 希有の存在である。

それだけに, 限られた紙数の内に彼の全業績を紹介することは, 不可能なことといわざるを得ない。しかし, 幸なことに, 彼の伝記や業績についての資料は, ダンネマンの大自然科学史を始めとして, かなり多く存在している。ここでは, 主として次の文献をもとに, 彼の生涯について, その業績だけでなく, 当時の社会的な背景などについても紹介しておきたい。

1. W.F. Magie: A source book in physics. Harvard Univ. Press, 1969¹⁾
2. C.S. Gillmor: Coulomb and the evolution of physics and engineering in 18th century France. Princeton Univ. Press, 1971²⁾
3. J. Heyman: Coulomb's memoir on statics. Cambridge Univ. Press, 1972³⁾

また, 1973年のモスクワ会議で, 国際土質工学会長であった Kerisel 教授が, Coulomb の土圧論の論文(上記3の文献の論文)が発表された1773年から丁度 200 年であることを記念して, Coulomb の生涯について特別講演をされた。この時の講演前刷⁴⁾も参考とした。なおこの講演内容については, 土と基礎の22巻1号(1974年)に紹介してある⁵⁾。

図-1 Coulomb の肖像²⁾

2. 生い立ちから士官学校卒業まで

Charles Augustin Coulomb (シャルル・オーギュスタン・クーロン, 1736-1806) は 1736 年 6 月 14 日, フランスのボルドー市から約 100 km 離れた Angoulême (アングレーム) の町で, アンリとカトリーヌ夫妻の長男として生まれた。Coulomb 家は代々, 大学町 Montpellier (モンペリエ) 一地中海沿岸にあり, マルセーユの西 150 km の町一の法律家であったが, アンリは軍籍を退いた後, ルイ14世の王室財産管理人となって, Angoulême に住んでいたのである。

幼い少年時代に, 一家はパリに移住した。母親のカトリーヌはセナックの町の富裕な家の生まれで, 彼を医者にしたく思っていたので, 有名な私立高校 College Mazarin に入学させた。この学校は数学の教育に優れていて d'Alembert

*広島大学教授 工学部土木工学科

bert (ダランベール) や Lavoiser (ラボアジエ) 等もここで学んでいる。彼はこの学校では、数学の授業に夢中で深入りしたために、母親の希望に反して、将来数学者として立ってゆこうと決心するようになった。

父アンリはパリに移ってから、金融関係の会社に勤め始めたが、ここで投機に手を出して失敗し、無一文になって家族とわかれ、郷里 Montpellier に引込んでしまった。シャルルは、母の援助のもとに医学の勉強を始めるようすすめられた。しかし数学への志望を絶ちがたく、ついに父をたよって Montpellier に移り、数学の勉強を続ける道を選んだ。

Coulomb 家の本家のルイは、シャルルのいところになるが、Montpellier の町では顔役で、パリについて2番目に古い科学アカデミーの有力会員であった。彼は若いシャルルをアカデミーに紹介し、そのため数学の論文を何篇か発表することが出来ることとなった。1753年には19才でアカデミーの準会員となり、さらに21才のとき正会員となっている。ここで15か月間正会員となっていた間に5篇の論文を発表しているが、この中には天文学に関するものも含まれている。彼の関心が、純粹の数学から遊星の運動のような実際問題へもむけられ、天体観測などを自ら行っている。

Montpellier での生活は、シャルルの知的好奇心を満足させることは出来たが、自分の生活をささえるための職業をここで見付けることは困難であった。彼は慎重に考えた上で、軍の学校に入って技術者として立ってゆこうと決心するようになった。当時 Mézières (メジェール) に Ecole du genie (School of Military Engineering) という学校があり、これは軍の士官学校の一つであるが、ヨーロッパで最も権威のある技術者養成の学校とされていた。

1758年の夏、シャルルは単身でパリに出て、入学試験のための準備を始めた。1760年に大数学者カミュによる入学試験にパスしてエコールに入学し、軍技術者としての道を歩み始めるのである。この当時、この学校に入学を認められるのは、原則として貴族の子弟に限られていたが、シャルルは科学アカデミーでの活動をカミュに認められて、特別に入学を許されたということである。

学校時代にどのような教育をうけていたかということは、その後の彼の生涯との関係から興味深いところであろう。当時の士官学校では、週のうち3日は座学にあてられ、毎日午前中の3時間は建築設計製図、地図作成等に、午後の3時間は数学ということになっていた。残りの3日間は野外実習で、測量や地図、築造技術などの実習というカリキュラムであった。このうち数学の授業では、初等代数、幾何学、力学などが教えられていたが、シャルルにとって、これらは既に物足りないものであった。彼は個人的に先生の仕事に協力を申し入れて、初等実験物理学のテキストをまとめた。これが後に出版されて、当時の標準のテキスト・ブックになるのであるが、この中では、重力、光、天文学、電

気および磁気が取上げられている。また、カミュの数学のテキストに、射影幾何、動力学、水力学等をつけ加えることを手伝い、この方は彼の卒業後、新しいテキストとして印刷されている。このような努力にもかかわらず、実学を重んじる学校の方針のために、彼の卒業時の成績はあまりかんばんしかなかったということである。いずれにしても、学校時代から彼が非常に学究的で、暇な時間には先生の仕事を手伝ったりして勉強していた様子が想像されると思う。

3. 軍技術者としての生活

1761年11月に軍学校を卒業すると同時に、少尉に任官してブレスト港の守備隊に加わり、士官としての人生をスタートした。この時にブレストに配属されたことが、彼のその後の人生を決めることとなるのである。というのは、当時フランスはイギリスと7年戦争を戦っていたのであるが、1763年パリ平和条約で講和をむすんだ。その際、イギリスに占領されていたマルチニク島(メキシコ湾内の西印度諸島中の島)が返還され、破壊された城と町とを再建しなければならなくなった。1764年に再建案がまとまり、一団の軍技術者達がブレスト港からマルチニクにむけて出港した。その時1人の技術者が病気で倒れ、その代りとしてCoulomb が指名され、急きょ赴任させられることになった。この運命の悪戯が、後にCoulomb 土圧論を生み出すこととなるのである。

マルチニク島における、フォート・デ・フランス(後にフォート・ブルボンと名付けられた)の築城工事は、現在の金額にすると1200~1800万USドルに相当するといわれている大工事であったが、悪疫の流行のため、技術者達が次々と倒れ、27才のシャルルは実質的な責任者として、この城を完成するのである。彼は後にこの工事について、次のように述べている。

「私は8年間、ほとんど唯一人で1200人もの人達を使いながら、フォート・ブルボンの工事の責任者だった。この工事の最中に、しばしば仮定にもとづく計算や、小さなモデルによる実験をもとにした理論が、実際にはいかに不十分な指標にすぎないかということを経験させられた。そのため私は、技術者として事業に使えるような、あらゆる分野の研究に、毎日毎日打込んでいた」

この時の経験が、後の1773年の土圧論の論文に実を結ぶのであるが、自分自身何度も病に倒れながら、このような研究を仕事の合間に続けたということは、凡人には出来ないことであって、その努力には頭の下がる思いがするのである。1772年になって、病気のため8年間のマルチニクの仕事から解放された。この時に、彼の健康は全く破壊されてしまっており、その後の彼の生涯中、ついに健康を完全に取り戻すことが出来なかったといわれている。

1772年にマルチニクから本国へ帰って、Bouchain(ブーシャン)で軍の勤務についた。彼は築城の功績によって大

尉に昇進していた。1774年には Cherbourg (シェルブール) へ、更に 1777 年 Besançon (ブザンソン), 1779 年 Marseilles (マルセイユ), そして最後に 1781 年、丁度 20 年間の地方勤務のあとでパリに永住することが出来るまで、あちこちと転勤している。この 20 年間は、Coulomb がエンジニアとしての研究を中心に、次々と論文を発表した時期である。彼はマルチニクでの経験から、当時技術界の最高のテキストとされていた Belidor (ベリド) の *L'architecture hydraulique* が間違った理論や実験に基づいて書かれていることに気付く、これを書き直すことを自分のライフワークとしたい、と決心していたようである。

この間になされた主な業績について簡単に紹介しておきたい。このうちで土質工学に関係の深い論文についてはあとでくわしくのべることにする。仏本国へ帰ってきて最初に発表した論文が、有名な土圧論の論文、"*Essai sur une application des règles de Maximis & Minimis à quelques Problemes de Statique, relatifs a l'Architecture.*" (建築学に関して、静力学問題における上限、下限定理の応用について) である。この論文は土圧論についてだけ論じているものではない。まず材料の強度から書きおこして、石柱の破壊、はりの曲げたわみと破壊、およびアーチの設計法についても述べている。この論文がパリの科学アカデミーで発表されると、すぐに非常に高く評価され、彼はアカデミーの通信会員に選ばれている。この論文のための研究は、主としてマルチニク勤務中のものであるが、柱の圧縮破壊などについては、Bouchain での勤務中に実験を繰返し行ったことが明らかになっている。

この時代に、彼はもう一つの技術上重要なレポートをまとめている。それは 1776 年に発表されたマグネットコンパスに関するもので、「最良のコンパスの設計法」という科学アカデミーの懸賞論文に応募したものである。この中で、彼は磁場に関する理論だけでなく、ねじり、摩擦、流体抵抗など、コンパスの設計に必要な要因について、徹底的に研究した上で論文にまとめ、賞を獲得している。

1777 年に Besançon に移ってから、重要な仕事がないのを幸いとして、彼は自分の研究に没頭した。1779 年には、水中で作業するためのニューマチック・ケーソンの論文を書いている。同じ時期に、機械の仕事量に関する論文を発表し、人間の力の限界についての計算から、人間は鳥のように空を飛ぶことは出来ないことを証明している。

1780 年には摩擦に関する有名な論文を書き、再度科学アカデミーの賞を得ている。この論文において、これまで定説とされた Amontons (アモントン) の研究の疑問点を正すため、当時フランスで最も新しい Cherbourg 造船所の船台を使って、大規模な木材同士のすべり摩擦の実験を繰返している。この年彼は最後の地方勤務となった、Marseilles の近くの Lille (リーユ) に住んでいたが、ここで風車の設計法についての研究をまとめている。これが

彼にとって技術上の論文の最後のものとなった。

4. 科学アカデミー会員としてのパリでの生活

マルチニク島に始まって、20 年に及ぶ転々とした移動を伴った Coulomb の軍隊勤務は、彼にとって次第に苦痛なものとなってきた。彼は健康上の悩みをいつも抱えていたし、また研究のための実験装置を、引越しのたびにやり直さなければならない場合も生じてきた。さらに重要なことは、パリの科学アカデミーの会員の候補に挙げられるようになって、どうしてもパリに在住することが必要となってきたのである。

1781 年という年は、Coulomb にとって人生の転換期となった。彼は 9 月にサン・ルイ十字勲章 (Croix de Saint Louis) を授けられた。同時にパリ勤務となり、本省の監督官として、機械や港、運河等の建設工事をチェックする恒久的なポストにつき、それ以降はもはや転勤の心配はなくなった。12 月には科学アカデミーの正会員に選ばれ、学者、技術者として名声を確立することとなった。そして、この年を境として、これまでの工学を中心とした実務的な研究から一転して、物理学の研究を志すようになるのである。

18 世紀の後半における物理学の状態といえば、その中心をなすものは、力学、天文学、光学といった分野であり、熱、電気、磁気等の研究がやっと始められた頃である。Coulomb は 1781 年から 1806 年に亡くなるまでに、32 篇の論文をアカデミーに提出している。そしてその間再び 2 度のアカデミー賞を得ている。そのほかに 310 篇の委員会報告に名前を連ねているが、それらのレポートに共同研究者として名を並べた人達を挙げてみると、どのような人達が活躍していた時代であるかがよくわかる。

Baume, Biot, Borda, Bossut, Carnot, d'Alembert, Duhamel, Franklin, Lagrange, Laplace, Lavoisier, Legendre LeRoy, Monge,.....

1781 年以前の Coulomb の物理学上の研究は、マグネットコンパスに関する有名な研究を除いて、ほとんど力学に関するものであった。1781 年以降本格的に物理学の研究に没頭するようになってからの、主な業績について簡単に解説しておきたい。

1784 年、ねじり天秤 (Torsion Balance) についての研究を発表している。これは 1777 年のマグネットコンパスの研究の続きとして行ったものであるが、この中で、金属線のねじりに関して、弾性限界や加工硬化現象、焼鈍効果などについて研究している。彼がつくった天秤は非常に精密なもので、これが後年の電気、磁気の研究に大いに役立つことになるのである。

1785 年から 91 年の間に、電気学および磁気学に関する 7 篇の有名な論文を書いている。これらは静電気の性質に関するものが大部分であって、ねじり天秤をうまくつかって、物体の表面の電荷の分布を測り、また二つの同じ符号の静

電荷をもった球の反発力は、中心間距離の2乗に逆比例するという定理を発見している。これらの一連の研究によって、Cavendish（キャベンディッシュ、1731～1810）の研究とともに、静電気の性質については一応の結着をつけたといっていよい。電流という概念による電気学の発展は19世紀以降のファラデーやマックスウェルらの研究によることになるのである。Coulomb の電気磁気学の研究における最大の特徴は、詳細に検討されたアイデアに基づく実験的裏付けであって、この点、彼の前半生の技術者としてのキャリアが見事に生かされた研究というべきであろう。

5. 晩年における社会活動について

Coulomb は、軍技術者としては比較的ゆとりのあるポストにいて、科学研究に没頭したことは先にのべたとおりである。しかし、科学者、技術者としての名声が挙がるにつれて、当時のフランス国内の重要なプロジェクトに参加し、彼自身好むと否とにかかわらず、長期間にわたってこれらに専念し、いくつかの重要な決定を下している。その代表的な例が1780年代の前半のフランスをさわがせた運河計画であった。

当時フランスは強力な海軍力をもった英国と争っていた。そのため、南仏の物資を北部に運ぶのに、大西洋沿岸や英国海峡を通る海運にたよることが困難であった。どうしても国内の河川を運河で結び、北はダンケルク港から南はボルドー、マルセイユにいたる各都市間を舟運で結ぶ必要があり、このような大計画が立てられつつあった。たまたまブルターニュの州知事は、半島の南側のナンテ、ボルドーと北のレンヌ、サンマロを結ぶ運河計画を実施したく思い、中央政府に対して適当な技術者を派遣し、この計画を調査検討するよう求めた。これまでの技術的な業績からいっても、また科学アカデミーでの名声からも当然のなりゆきとして、Coulomb がこの調査コンサルタントの責任者に任命された。

彼は数か月もの間、パリを離れて現地を調査してまわった。現地の数百人の軍隊の協力を得て、測量やサウンディング^{注1)}にいたるまで徹底的に行ったために、当初の机上プランは到底実現不可能であることが明らかとなった。彼は各河川の水位が違うために、数多くの閘門を必要とすること、また河川の水深は少なくとも6フィートは必要であること、などを考慮すると、土砂浚渫に要するコストが莫大なものとなる。その上河川によっては潮汐の影響をうけて、水位が9フィートもあがる可能性があることや、内陸部への海水の浸入の影響もアセスしておかねばならないことなどを指摘している。

この間、Coulombはパリへの帰任をめぐって、Coulomb を現地へ留めようとする地元政府の要請をうけた上司と衝

突してパリに帰り、このトラブルがもとで遂に辞任を申し出るに至った。しかし決裁を求められた陸軍大臣は、Coulomb にやめられては困るという調査委員会側の強い要請と、軍の統制という両方の顔をたてるために、Coulomb の辞表を取りさげさせ、同時に命令違反の罪で1週間禁固に処することとして事件を落着かせた。Coulomb はさらに調査を続けるのであるが、結局この運河計画はこの時には実現せず、将来の夢として残されることになったのである。

この調査において、Coulomb の技術的な判断力が優れていることを知ったルイ王家の依頼によって、1784年Coulomb は運河問題を離れると同時に、「王家の水道と泉の管理者」という地位についた。これはパリ市の水道管理者というべきポストであった。当時の水道はセーヌ河の上流からパリ市内へ水を引き、数十か所の泉（fontaines—水くみ場というべきもの一）で給水するというシステムであった。古くは紀元数世紀の頃から造られたものとされているが、9世紀にノルマンの侵略によって破壊され、13世紀に再建されたものがCoulomb の時代まで次第に拡張されてきた。その当時既に人口に対して給水能力が不足していたので、セーヌ川に大きな水車をすえて取水するという案が出されていた。しかしこれに対して王家の中に強い反対があり、運河やポンプの問題にくわしいCoulomb の判断が期待されたのである。この仕事に関連して、Coulomb はワットの蒸気機関を始めてフランスの人達に紹介している。

その他の公共的な仕事としては、度量衡の改訂に関係したことが知られている。1788年、彼はBorda, Cassini, Lagrange, Laplace, Lavoiser, Mongeらと協力して、長さ、重さ、時間の標準を定める委員会を始めている。この仕事は丁度その頃勃発したフランス革命の間も続けられるが、Coulomb は1791年にこの委員会を追放されている。これは思想上の問題などではなく、個人的な理由によって誤って追放されたものとされている。

1789年に発生したフランス革命によって、いわゆる恐怖政治の時代（Era of Terror）となるが、Coulomb は有名な電気と磁気の研究に没頭していた頃である。革命の結果として軍技術者の数を減らすことになり、Coulomb は1791年中佐の地位で退役した。しかしアカデミーの仕事は続いていたので、パリに留まり、引続き研究発表をしていた。市民戦争の状況は次第に悪くなり、1793年にアカデミーは廃止された。その2日前に、彼はLavoiserに手紙を出して、摩擦に関する彼の論文に、小さな誤りがあるので訂正してほしい、と要求したことが記録に残っている。

科学アカデミーが封印されて多くの会員が追放され、Lavoiser と Condorcet（コンドルセ）が断頭台にあげられるに及んで、Coulomb はパリを離れ、最も親しい友人であったBordaとともにBlois（ブロワ）の別荘へ隠退した。しかしこの隠遁生活中にも、ポプラの木の樹液の流れ

注 1) 文献5)に当時のクーロンのサインの入った地層断面図の写真がのっている。

について実験を行い、後に論文にまとめている。物理実験の道具が手元に無くなれば、自然の観察をもとに研究を続けるというのが Coulomb 流のやり方というわけである。

ここで、Coulomb の晩年を華やかに色どった出来事についてふれておかねばならない。Coulomb は軍隊を退役する直前に、Blois で20代の美しい女性、Louise Françoise (ルイゼ・フランソワ) と恋に陥り、共に生活するようになった。1790年、長男のシャルル2世、また1797年、次男の Henry Louis (アンリ・ルイ) が生まれている。しかし、正式に結婚の届を出したのは1802年のことであった。それまで長年の間、健康に悩みながら、仕事一すじに真理を追いもとめてきた Coulomb に、革命を機として、人生を見直し、自らの周辺をかえりみる余裕が生まれたのであろうか。

フランス革命も次第に落付いて、1795年にはアカデミーの後身として、Institut de France という組織が出来た。Coulomb は再びこのメンバーとなり、後には名誉会長にまでなるのであるが、その後もまだ多くの研究論文を発表している。彼の最後の研究は1795年～99年になされた、人間の労働の効率に関するものと、1800年～1802年の間にねじり天秤について再び研究したものである。前者は1世紀後に Taylor (テーラー) によって始められた人間工学 (ergonomics) の前駆的研究といってよい。また、最後の論文を1802年に発表したとき、彼は67才であった。

1802年に、ナポレオン・ボナパルトは Coulomb を公衆教育の最高監督官 (Inspector General) に任命した。この時代、彼は lycées (リセ) というフランス独特の教育制度を確立することに努めた。しかし、彼は既に健康を完全にそこねていて、1806年の夏、病に倒れてから再びたえず、1806年8月23日の朝、ねむるように大往生をとげた。70才であった。

6. Coulomb の論文について

Coulomb が書いた多くの論文のうち、土質力学に関係の深いものについて、少しくわしく紹介しておきたい。先にのべたように、これらはいずれも Coulomb が軍隊の地方勤務の間に書いたものである。

1) 1773年の土圧論について

Coulomb 土圧論として歴史的に有名なこの論文には、各種の問題が取上げられている。中でもはりの曲げとか、アーチの破壊強度などの部分は、構造力学の立場から興味深いところであろう。ここでは土質力学に関係のある部分だけ取り上げておきたい。なおフランス語で書かれた原文、およびその英訳が文献3)にのせられている。

Coulomb 以前の時代における擁壁の土圧の問題については、18世紀の初頭からいくつかの研究や提案がされている。Vauban (ボウバン) は経験に基づいて6～80フィートの高さの擁壁の設計法についての基準を提案しているが、これは後に Belidor のテキストにものせられている。初め

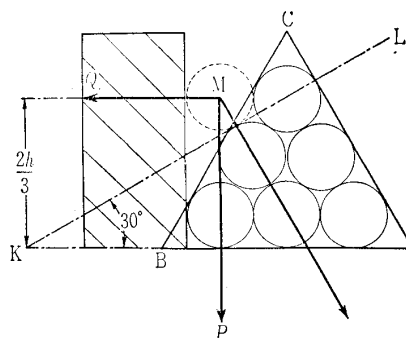


図-2 Couplet の土圧の考え方

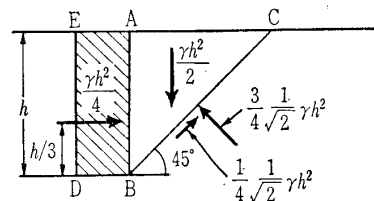


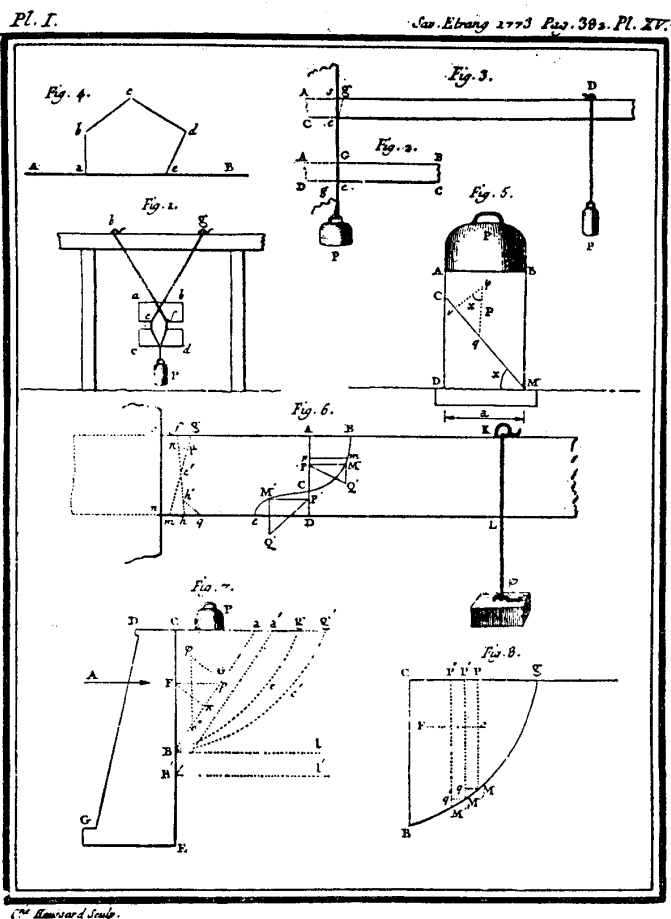
図-3 Belidor の土圧論

て理論らしい土圧論を提案したのは Bullet (ビューレ) であるとされている。彼は土を等粒径の摩擦のない球であると考え、これをつみ上げると水平に対して 60° の安息角が出来るので、図-2の正三角形の面に沿って土の中にすべり面が発生すると考えた。彼の理論ではまだ定量的に土圧計算が出来るところまでは行かなかったが、後の研究者達に大きな影響を及ぼした。1720年代の終り頃、Couplet (クープレ) は Bullet の仕事を発展させて定量的に土圧を計算する式を提案した。彼はすべり面は Bullet のように図-2の BC ではなくて、KL であるから、安息角は水平に対して 30° と考える方が正しいと主張した。そして土圧の合力は擁壁の $2/3$ の高さに働くものと考えた。

理想的な球のモデルでなく、実際の土について問題を考え始めたのは Belidor であった。彼は実際の土の崩壊面が 45° をこえることはまれであることから、土の安息角を図-3のように 45° と仮定した。そして、この面に沿って土がすべると考え、またすべり面に働く摩擦のために、土圧が $1/2$ に軽減されると考えた。この時の土圧の大きさは $\gamma h^2/4$ であり、その作用点は擁壁の高さの $1/3$ であるとした。

以上ののべた土圧論では、いずれも土は安息角以下ではすべらないので、擁壁の背後の土の中のすべりは安息角に沿って発生し、それより上の部分の土のくさびが擁壁に土圧としてかかる、と考えるものである。この意味でいえば、Coulomb 土圧の特徴としてよく出てくる土楔論^{つづ}というのは、Coulomb 以前からあったことになる。

しかし、Coulomb はこのすべり面が安息角であるとは考えなかった。Coulomb は擁壁の裏込めの中にすべりが発生するときに、その面に働く摩擦力と、土楔の重量と土圧の三つの力がつり合うと考え、この条件から、すべり面



図—4 1773年の論文の付図

がどこに発生したときに土圧の大きさが最小となるか、すなわち最も小さい力で破壊が発生するかを考え、これが実際に裏込め中に生じるすべり面であるとした。したがって彼は先ず土中に任意の勾配のすべり面を仮定し、それについての平衡条件から土圧を求めた。この土圧が最小となる条件として微分商=0の式からすべり面の勾配を定め、これから土圧の大きさを定めるといった方法をとったのである。彼の論文の付図をもとに説明しよう。図—4の中の Fig. 7で、すべり面を Ba と仮定する。図中で、Ca=x, CB=a, δ : 粘着力, $1/n$: 摩擦係数, g : 単位重量, ϕ : 土楔の重量 $=1/2 \cdot g \cdot ax$, A: 土圧

今すべり面の方向の力の分力を求めてみると

$$\left[\phi a - Ax - (\phi x + Aa) \frac{1}{n} - \delta (a^2 + x^2) \right] / (a^2 + x^2)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

となる。これは平衡状態にあるから =0 とすると

$$A = \frac{\left[\phi \left(a - \frac{x}{n} \right) - \delta (a^2 + x^2) \right]}{\left(x + \frac{a}{n} \right)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

この式が最小となる条件すなわち $dA/dx=0$ から x が定まる。

$$x = -\frac{a}{n} + a \sqrt{1 + \frac{1}{n^2}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

(3)式を(2)式に代入すると土圧が求まる。

$$A = ma^2 - \delta la$$

ここに

$$m = \frac{1}{2} g \left[\left(1 + \frac{1}{n^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{n} \right]^2, \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$l = 2 \left[\left(1 + \frac{1}{n^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{n} \right]$$

受動土圧の場合は(2)式の符号が逆になって

$$P = \frac{\left[\phi \left(a - \frac{x}{n} \right) + \delta (a^2 + x^2) \right]}{\left(x - \frac{a}{n} \right)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

からスタートすればよい。

Coulomb の原式はわかりにくいところがあるが、現代の記号に直すと、 $\delta \rightarrow c$, $\frac{1}{n} \rightarrow \tan \varphi$, $g \rightarrow \gamma$, $a \rightarrow H$ である。また、

$$m = \frac{\gamma}{2} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad l = 2 \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \dots\dots\dots(6)$$

であることを用いれば(4)の土圧式は

$$P_A = \frac{\gamma H^2}{2} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) - 2 c H \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

となって現在用いられている式と全く同じになる。

彼の着眼点の優れた点は、土圧に上限値と下限値があるということを見出したこと、すべり面は安息角ではなくて、土楔の平衡条件からきまってくる。すなわち摩擦角の関数として定まること、などを理論的に示したところにある。彼の用いた手順は、後の Rankine 土圧に比べて、数学的華麗さでは劣るかも知れないが、現象の本質を整理してその要点をつかみ、必要最少限の数学的手順を用いているという点など、非常にうまいやり方だと思う。更に彼は現実の土について、次のようにのべている。

イ) 擁壁の壁面に働く土の摩擦力は、土の内部摩擦に比べて小さい。

ロ) 土中に浸入する水は、しばしば壁面に集中して流れるので、土圧を摩擦のない流体圧に変えてしまうことがある。これを避けるためにドレーン・パイプを裏込め土の中に挿入して排水すればよいが、よくこれがつまったり、凍結したりして役にたたなくなっていることが多い。

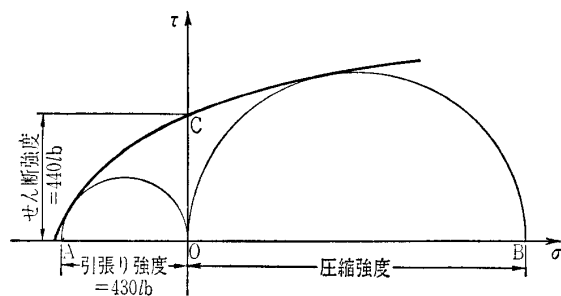
ハ) 土の中の含水量は土の重量を増加させるだけでなく摩擦にも影響を与えている。

ニ) 新しく掘り乱された土の c はゼロとしてよい。

このような記述からみても、Coulomb は現実の土の性質をよく観察し、理解していたことがわかる。

2) 粘着力、および摩擦について

図—4の中の Fig. 1 と 2 は、Coulomb の粘着力 (Cohesion) に関する考え方を示す実験である。この当時、粘着力とは連続した物体を引離すのに要する力、摩擦力は二つの物体をすり動かす時の抵抗力というふうに理解されてい



図—5 粘着力について

た。Coulomb は石材について粘着力を調べるため、Fig. 1 のように切り込みをつけて分銅で引張って破壊させた。同時に Fig. 2 のように、同じ断面積の石材を水平に固定し、その固定点で鉛直に載荷してせん断破壊させている。彼はその結果として、前者から 430 lb、後者から 440 lb の強度を得ている。この実験は現代風にかけば図—5 であるが、彼は多くの実験から後者の方法の方がいつも少し大き目の値を与えると述べている。

一方摩擦については、1773年の研究のころは Amontons の説に従っていたが、これに疑問を感じていたようで、1780年に徹底的な研究を実施している。この時の論文、—Théorie des machine simples.—は彼の生涯を通じての代表作の一つであろう。当時摩擦に関して最も権威ある理論は Amontons によるものであって、二つの物体間に働く摩擦はそれを押し合う力に比例し、接触面積には関係しない。またこの摩擦係数はどの物質でもほぼ同じで 1/3 くらいであるとしていた。

これに対して Coulomb は、精緻な実験を数えきれぬほど繰り返したあげく、彼のいわゆる 2 項公式にたどりつくのである。彼は摩擦について考慮すべき要素として、

イ) 材料の性質と表面のコーティング

ロ) 表面積の大きさ

ハ) 垂直力

ニ) 二面が動き出すまでの接触時間

ホ) 運動の相対速度

そして一般的に摩擦力は $F = A + \rho/\mu$ のように定数項をもった 2 項公式で表さねばならないとしている。この定数項は Coherent Force と呼ばれるものであるが、Coulomb

はこれに対して物体の界面の状態のモデルを考えて説明を加えている。ただし金属とか 1 平方 ft あたり数 100 lb をこえるような高い圧力の場合は、この値は無視して差しつかえないとしている。なお摩擦によるエネルギー・ロスのことに考えつくようになるのは次の世紀に入ってからである。

7. おわりに

Coulomb の業績や生涯について書かれた本を読んでいると、今更ながらに彼の業績の多様性、内容の豊富さ、特に基礎となるデータが無数にあることに圧倒される思いがした。これが 18 世紀の戦争や革命のさなかになされたとは信じられないほどのものであった。勿論実験に用いられた装置等は、現代の複雑精密なものと比べれば、たしかに単純幼稚なものである。しかしこれによって物の本質を見きわめ、公式や定理にまとめる際の洞察力のすばらしさは、これらの研究が現在でも古さを感じさせずに生き続けている根源をなしているといえよう。

一生病とたたかいながら、また日常の仕事に追いかけるながら、こつこつと努力を積み上げた Coulomb の生涯、その生きざまと業績を振り返るとき、この一人の大先達から受ける感銘は、何人をも奮起させずにおかぬものがあるのではなからうか。

最後にこの小文をまとめるにあたって、貴重な資料をお貸しいただいた、広島大学総合科学部、小此木、大内両教授、また資料収集を手伝って下さった同付属図書館増元氏に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) W.F. Magie: A Source Book in Physics, Harvard Univ. Press, 1969.
- 2) C.S. Gillmor: Coulomb and the Evolution of Physics and Engineering in 18th Century France, Princeton Univ. Press, 1971.
- 3) J. Heyman: Coulomb's Memoir on Statics, Cambridge Univ. Press, 1972.
- 4) J. Kerisel: Bicentenary of the 1773 Paper of Charles Augustin Coulomb. Special Lecture, 8th ICSMFE (Moscow), 1973.
- 5) 網干寿夫: 特別講演, クーロン理論 200 年を記念して, 土と基礎, Vol. 22, No. 1, p. 7, 1974.

(原稿受理 1983.8.11)