

H.P.G. Darcy (ダルシー)

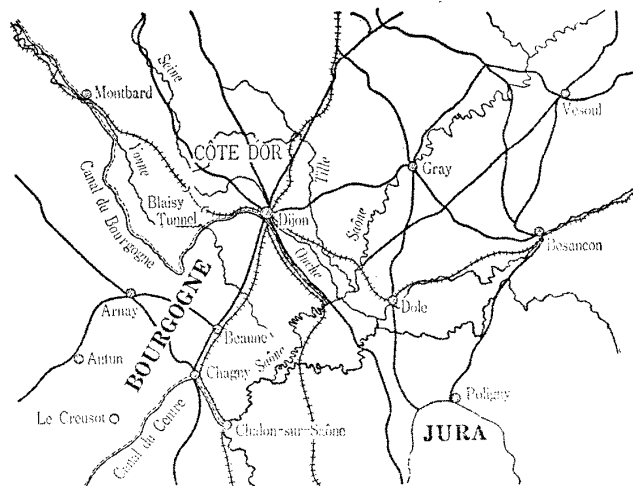
く ぼ た けい いち
久 保 田 敬 一*

1. Darcy の略歴

Darcy (Henri-Philbert-Gaspard d'Arcy) はフランスの Dijon (ジジョン) 市の財務担当の行政官であった Jacques-Lazare-Gaspard d'Arcy の子息として、1803 年 6 月 10 日 Dijon 市に生まれた。

Dijon 市はフランスの東北地方 Bourgogne (ブルゴニュ) 地区の Côte D'Or (コートドル) 県の首都で、現在は人口約16万の Saône (ソヌ) 河の支流 Ouche (ウシュ) 河にそった美しい古い街である。1179～1477年には Bourgogne 公領地の首都として栄えた歴史的に由緒ある都会で、1851年に鉄道が敷設されてから急に近代化が進み、特に工業が発達し現在でも食品加工、機械、化学、醸造などの産業がさかに行われている。またブルゴニュ・ワインの集散地としてもよく知られている。市内にはブルゴニュ公宮殿などの遺蹟のほか、古い教会、聖ベニーニ大聖堂やフィリベール教会などが建ち、静かな古朴さを誇っている。1850年頃の人口はわずかに 3 万 2 千人ほどであった。

Darcy は1823年に工芸専門学校 (Polytechnique) を卒業して直ちに Dijon 市土木局に技手 (élève ingénieur) として勤務する。時に年令20才である。1827年5月1日に技師補になり、有能な青年技官として認められ、翌1828年4月27日付で技師に抜擢昇任されている。25才の若さである。技師に任命されてからすぐに Jura (ジュラ) 地方 (Dijon 市南東約 100 km のスイス国境に近い地区) に赴任するが、間もなくまた Dijon に召還されている。この頃からいよいよ土木技術者としての彼の活躍が始まり、幾多の重要な仕事に従事することになる。1828年といえば、我が国においてはシーボルト事件がぼつ発した年であり、明治をさかのぼること約40年、徳川第11代將軍家齋が太政大臣に任ぜられ、大江戸時代といわれた、けんらんたる江戸文化の絶頂の末期である。伊能忠敬の大日本沿海輿地全図が完成し上呈されたのが1821年であるから、その頃 Darcy は18才、工芸専門学校の学生であったことになる。その後1830年彼は Dijon 市に水道水を引く工事計画の仕事を命じられる。水道管の敷設計画にあたって、どうしても Saône 河を渡河させねばならなくなり、大きな橋梁を二つ架設することを考える。そして1834年にその架設工事が着手される。



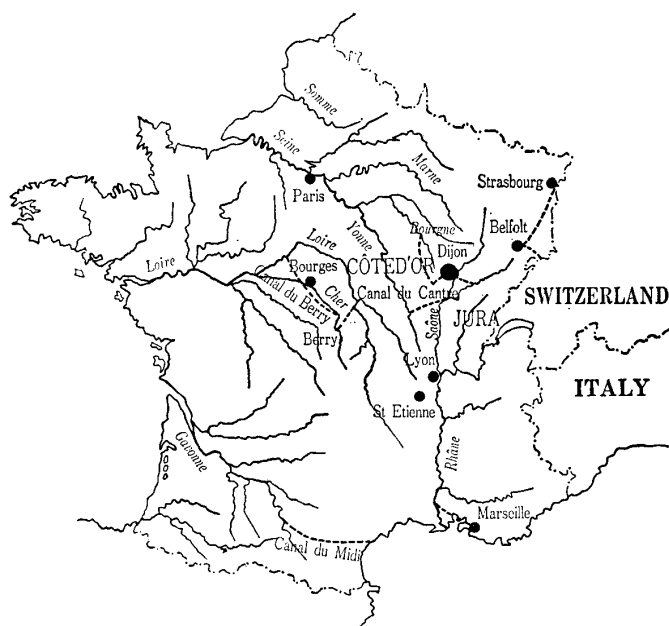
図一1 Dijon 市付近とブルゴニュ運河、中央運河

1838年秋、彼はまた Côte D'Or 県の主任技師として Paris-Lyon (パリとリヨン) 間の鉄道路線の決定計画にあずかる。この路線は無論 Dijon を経由するが、その南東部 Saône 河の上流 Ouche 谷にある Armencon (アルメコン) 峡谷をどうしても通過させねばならず、この路線決定について彼は大いに頭を悩ます。そればかりでなく、Côte D'Or の Mt. Tasselot (タースロー山, 593 m) を貫く Blaisy (ブレイジイ) トンネル (長さ 4.1 km) を開削することになる。そして1840年5月7日にその工事が着工される。このように彼は次から次へと責任ある主任技師として広い土木分野で活躍する。

そのうち、理由が具体的に明確でないが、政治的に突如1848年3月18日付でその要職から解任される。しかしそれもわずか3か月で、その年の6月21日に再びパリ市の土木局長の要職に就任する。実はその少し前に、既に Canal du Berry (ベリー運河) 建設の主任技師としてパリ市に迎えられていたのである。

ここで少しくヨーロッパ、特にフランスの運河制度について触れ、運河による水運がいかに重要な輸送機関であったかをみてみよう。フランスはドイツに比べると、その当時は石炭など輸送する大物資が少なく、運輸量からいえばドイツの約半分以下であった。しかし主要河川を運河によって連結した数多くの可航水路は、極めて運賃の安い便利な輸送機関であった。このようなフランスの運河は、初め

*(財)大阪土質試験所 理事



図一2 フランスの主要河川とベリー運河

18世紀には個人経営の仕事として発足し、逐次開削拡張され、ついに有料道路の補助運輸機関として重要視されるようになった。それに伴って次第に国がこれを管理経営するようになる。しかし鉄道が敷設されると、その影響をうけてこの運河輸送は1840年頃から一時衰退する傾向をみせた。しかしこれもしばらくの間で、また水運が鉄道輸送よりも優れていることが再認識されて、フランスの運河は大いに改修、築造される。その優れた点の一つは何といっても運賃が低廉であるということで、これが鉄道運賃引下げのけん制策としても重視されることになった。水路は幹線路と次線路に分けられ、前者は300トン級船舶、後者は100トン級船舶の運行が可能な水路とされている。現在、運河は国の建設省が管理し維持を行い、河筋水路を含めて、それらの通航料は課徴しないことを目標にしているから、料金は極めて低率のものとなっている。現在でもフランス全輸送荷物量の約25パーセントが水運によるものである。このような運河はフランスには数多くあって、その総延長は5300kmに達している。Bourgogne 運河や Canal du Centre (中央運河) などはその代表的なものである。Bourgogne 運河は Seine (セイヌ) 河の支流である Yonne (ヨヌ) 河と Rhône (ローヌ) 河の支流である Saône 河とを連結するもので延長443km、水門191を有している。また中央運河は Loire (ロアール) 河と Rhône 河とを連結し、Loire 河口から640km上流地点から発してChalon-Sur-Saône (ソーヌ河のチアロン) 付近に至るもので84の水門を有している。このように新しい運河の開削計画は最も困難で重要な土木事業であったわけで、その主任技師の責任は極めて大きかったことがわかる。

Darcy が前述のように1848年5月から計画した Canal du Berry は Loire 河と Cher 河とを結ぶもので、次線

路として建設され、パリから約270km南の Cher 地区に造られたものである。しかし現在はほとんど利用されていない。

彼は1850年、土木局長のとき都市道路の舗装問題を研究するためにイギリスのロンドンに出張している。彼はそれを機会に都市道路の問題ばかりでなく、イギリスにおける新しい土木技術全般をつぶさに調査研究している。その結果は次の報告書にまとめられ建設大臣に提出されている。

Le Pavage et le macadamisage des chaussées de Londres et de Paris, 1850.

1850年4月30日、彼は技術担当の監察官 (Inspecteur divisionnaire) に任命される。これが彼にとって最後の公職となったわけである。

以上述べたように、Darcy は運河、鉄道、道路、橋梁、トンネル等土木技術のあらゆる分野において、素晴らしい指導力を発揮した優れた技術者であったことは確かである。また一面、学者としても優れていたことは彼の著書や論文によっても推察できる。その彼が1855年ついに健康を害し、それを理由に辞任を申し出ている。そしてその後3年、1858年1月3日、ついにパリ市において逝去、年令54か年半という比較的短い生涯を終えたのである。

2. Darcy の研究

Darcy は前に述べたように、土木技術者として広い分野にわたって目覚ましい活躍をしたが、今日では一般に Hydraulic Engineer としてよく知られている。それは以下に述べる有孔質媒体を透過する浸透流体の運動を支配する法則、いわゆるダルシー法則があまりにも著名であるからであろう。また彼自身が最も力を入れた研究が、この問題であったことは、彼自身が著書で述べているとおりである。フランスにおいては、1845年頃から工業が急激に発達し、それに伴って工業用水の需要が次第に拡大していった。その供給源の一つとして地下水が考えられ、圧力井戸などの削井が盛んに行われるようになった。いきおい地下水に関する研究が、各研究機関や大学で行われるようになり、Darcy も研究者のひとりとしてその研究に組み、沖積層、特に一般堆積層中の地下水の流動に関する機構を明確にしようと試みた。この研究は彼が最も力を注いだものとなり、その結果をまとめたのが次の著書である。

Les fontaines publiques de la ville de Dijon.

Victor Dalmont, Paris Éditeur, 1856.

その当時は、水の流れや浸透流に関する基本的事項が、まだ解明されていなかったから、この著書の発行がし界に大きな影響を与えたことは想像に難くない。この著書は、水の流れに関する問題を広い範囲にわたって述べたもので、647ページに及ぶ大きいものである。その内容の主な部分は、水流に関する基本的一般理論の解説とその応用について述べたものである。また水流の分岐に関する公式などの

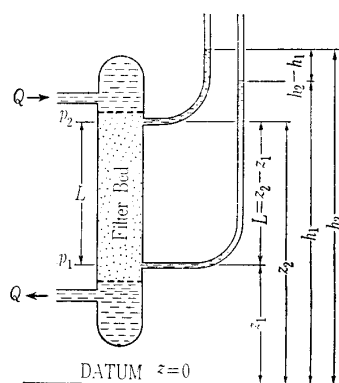


図-3 Darcy の透水実験装置

列記説明, そのほかいわゆる多孔質媒体を透過する浸透流の基本理論について述べている。また付録の形で, 各都市への導水の具体的方法, 水の浄化, ろ過の方法, 鑄鉄管, 鉛管, 錫板あるいは歴青材で作った円管による導配水の方法などにも言及している。円管内の流れについては別に次の論文に詳細に述べている。

Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux, 1857.

そのほかにも小論文として

Recherches hydrauliques, terminées et éditées par H. Bazin, 1865.

を, また土木紀要(dans Annales des Ponts et Chaussées)に

Charie-Marsaines, 1858.

を発表している。

Darcy が前著書の中で示した, 堆積層中の地下水流を支配する法則は, 時のヨーロッパに大きな刺激を与え, これを切掛けにして地下水に関する研究が一段と盛んになり, J. Boussinesq, G.A. Daubrée, J. Dupuit, P. Forchheimer, A. Thiem 等の有名な研究者が続出したことは周知のとおりである。

Darcy が1856年に砂を用いて行った透水実験装置は, 図-3に示すような簡単なものである。同じ断面形と断面積をもった細長い容器に, 均等に砂を詰めて床とし, これに非圧縮性の流体(常温の水)を注入して飽和状態にする。図のように容器の両端近くにマノメーターを取り付け, また別に水の注入口と排出口を設ける。この装置に注入口から単位時間当たり一定量の水を注入してやると, 水はろ床を浸透して排出口から流出し, マノメーターにはそれぞれある高さまで水位が上がる。Darcy はこの実験から透水量が次式で示されることを提唱した。

$$Q = k \cdot A(h_2 - h_1)/L \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに, Q : 単位時間当たり透水量, A : 容器の全水平断面積, h_1, h_2 : マノメーター水位, L : マノメーター間隔である。したがって $(h_2 - h_1)/L$ はろ床の単位長さ当たりの動水勾配である。この関係を一般にダルシー法則とよ

んでいることはしばしば述べたとおりで, k は流体がこのろ床を浸透する容易さを決定するもので, 透水係数とよんだのは1930年少し前からである。Nutting をはじめ多くの研究者が, この関係式についていろいろな検討を加えて今日に至っているが, 透水係数の物理的意味は, 多孔質媒体の物性と流体の粘性を考えた Hagen-Poiseuille の式と対比して検討する必要があるし, 次元解析を行って他の諸量間との関係を明確にしなければならないことは, これまでの研究者が説いているとおりである。更にこの法則が適用される条件と範囲は無論この問題の検討課題である。式(1)を流体の圧力と密度で書き直すと, 図から $p_2 = \rho g(h_2 - z_2)$, $p_1 = \rho g(h_1 - z_1)$, $L = z_1 - z_2$ であるから,

$$\left. \begin{aligned} Q &= kA[(p_2 - p_1)/\rho gL + 1] \\ Q &= k'A(p_2 - p_1 + \rho gL)/L \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに ρ : 流体の密度, g : 重力加速度, $k' = k/\rho g$ である。したがって k のディメンジョンは $[LT^{-1}]$, k' のディメンジョンは $[M^{-1}L^3T]$ である。

3. Darcy 単位

ダルシー法則の透水係数 k は前述のように多孔質媒体の性質と流体自体の物性に関係するもので, 前者には媒体の間隙径と間隙率, 粒径分布と詰まり度および間隙形, それにこれら以外の物理的影響が含まれる。また後者には流体のせん断抵抗である粘性と密度が関係し, いずれも温度の関数と考えられるものである。そこで k がこれらの関数であると考え, 媒体の間隙量を示すのにその代表的粒径 d を用い, また流体の浸透量が媒体の間隙量と直線的関係にあると仮定すると,

$$k = f(\mu, \gamma, d) \quad \dots\dots\dots(3)$$

で示される。ここで μ : 流体の粘性, $\gamma = \rho g$: 流体の単位重量である。これをディメンジョン式で示すと

$$k = \frac{C\gamma d^2}{\mu} \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。ここで C はディメンジョンをもたない係数である。さて上式で媒体の性質だけに関係した部分を取り出して

$$k = Cd^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

とすれば式(1)は

$$Q = A \frac{k\gamma}{\mu} \frac{dh}{dL} \quad \dots\dots\dots(6)$$

となる。この k は一般に Specific Permeability とよび暗に浸透水量を決定する間隙面積を示すものである。この k は Wyckoff 等が幾多の実験や実測を行って, 正しい値を与えるという実証を公表するまでは, なじみが少なくほとんど使用されなかった。これを単位 cm^2 , ft^2 等で表すと一般に非常に小さい数値となって実用的でない。そこでもっと大きな単位として, 次に示すような単位 Darcy が用いられるようになった。しかしこれも石油工学の分野に用いられていて, 地下水学で用いられるようになったのは1935

年頃からである。

式(6)を書き直すと

$$k = (\mu Q / A) / \gamma (dh / dL) \quad \dots\dots\dots(7)$$

であるから、これに各単位を代入して、

$$1 \text{ darcy} = \frac{1 \text{ centipoise} \times 1 \text{ cm}^3 / \text{sec}}{1 \text{ cm}^2 / 1 \text{ atmosphere} / 1 \text{ cm}} \quad \dots\dots\dots(8)$$

を定義した。式(8)にそれぞれ次の粘性と圧力値を代入すると、水の粘性は 20℃で 1 centipoise であるし

$$1 \text{ centipoise} = 0.01 \text{ poise} = 0.01 \text{ dyne} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2$$

$$1 \text{ atmosphere} = 1.0132 \times 10^6 \text{ dyne} / \text{cm}^2$$

であるから、

$$1 \text{ darcy} = 0.987 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

をうる。つまり 1 darcy は、1 centipoise の粘性流体が、圧力勾配 1 atm./1 cm のもとで、1 cm³/sec/cm² の流速で流出するときの浸透係数であって Muskat 等¹⁾ が初めて定義したものである。地下水の分野では、普通透水係数を単位動水勾配に対する浸透水の速度でいい表すが、いまこれを単位 Darcy で表してみよう。例えば 1 cm/sec の浸透速度は、20℃の水の単位重量は $\gamma = 0.998 \text{ gf.}$ 、粘性係数は $\mu = 1 \text{ gf} \cdot \text{sec} / \text{cm}^2 = 980.7 \text{ poise} = 0.9807 \times 10^5 \text{ centipoise}$ であるから、

$$1 \text{ cm} / \text{sec} = 0.998 / 0.9807 \times 10^5 = 1.02 \times 10^{-5} (\text{cm}^2)^{2)} \\ = 1.033 \times 10^3 \text{ darcy}$$

である。

4. む す び

以上 Darcy の略歴、研究、Darcy 単位について概略を述べたが、今日をさかのぼること約 130 年以前に、Darcy 法則とよばれる偉大な法則を見出し、現在においてもそれが厳然として確立されていることは、それだけでも篤学の士であったといわなければならない。Darcy は多孔質媒体の浸透流は、ニュートンの摩擦法則を考慮したナビエ・ストークスの動水学式を検討しなければならない問題で、実用式化することは極めて困難であると理解していた。そこで比較的簡単な法則式を見出すことを真剣に考え、それを実験によって導き出そうとした³⁾。Darcy の法則は化学分野のろ過問題でも重要な法則として取り扱われている⁴⁾。

我々が常に考えることは、一見単純に見える現象、法則の中に無限の真理が整然と配列されているということ、自然の摂理は深遠であるということである。先覚者の経歴を学んで一層その感を深くする次第である。

参 考 文 献

- 1) M. Muskat: Physical Principles of Oil Production, New York, McGraw-Hill Book Co. Inc., Chap. 3, 1949.
- 2) A.E. Scheidegger: The Physics of Flow Through Porous Media, The Macmillan Company, New York, Part IV, p. 71, 1960.
- 3) H.R. Cedergren: Seepage, Drainage, and Flow Nets, John Wiley & Sons, 2nd ed., Chap. 3, p. 87, 1977.
- 4) John, H. Perry: Chemical Engineers' Hand Book, New York, McGraw-Hill Book Co. Inc., Chap. 5, pp. 5-52, 53, 1963. (原稿受理 1983.6.14)

学会刊行物案内

入門シリーズ

B 6 判 送料各 1 冊 300 円

1. 土質工学入門

172 ページ 会員特価 1,200 円 定価 1,500 円

2. 土質・基礎工学へのコンピュータ利用入門

277 ページ 会員特価 2,000 円 定価 2,500 円

3. 土質・基礎工学のための地質学入門

199 ページ 会員特価 2,000 円 定価 2,600 円

4. 構造物基礎入門

301 ページ 会員特価 2,300 円 定価 2,900 円

5. 土の見分け方入門

151 ページ 会員特価 1,300 円 定価 1,600 円

6. 根切り・山留め・仮締切り入門

253 ページ 会員特価 2,000 円 定価 2,600 円

7. 土の調べ方入門—調査・試験・計測—

222 ページ 会員特価 1,700 円 定価 2,200 円

申込み先 社団法人 土 質 工 学 会 〒101 ☎03-251-7661(代)

東京都千代田区神田淡路町 2-23 菅山ビル 郵便振替 東京 4-40786