

デジタル計算機による滴状凝縮現象のシミュレーション

Simulation of the Process of Dropwise Condensation by Digital Computer

棚 沢 一 郎・宮 沢 忠 男
Ichiro TANASAWA and Tadao MIYAZAWA

1. 目 的

滴状凝縮の際の熱伝達に影響を与える因子としては、蒸気および凝縮液の物性値（凝縮熱、表面張力、粘性係数、熱伝導率など）、蒸気の流れ、蒸気の圧力、蒸気の過熱度、凝縮面の温度、熱流束、凝縮面の形状・配置、非凝縮性ガスの存在、凝縮面の表面状態（粗さ、促進剤の種類）などが考えられる。滴状凝縮の熱伝達率を測定する実験では、上にあげたような諸因子の組合せを適当に選び、できるだけ広範囲に使えるような結果を得ようと努めるわけであるが、これを無計画に行なわず、現象の本質的なメカニズムをしっかりと把握した上で能率的に実験を行なう必要がある。

このような考え方を実行するための一つの補助手段として、筆者らはデジタル計算機によって滴状凝縮現象をシミュレートし、計算機のもつ迅速性・柔軟性などの特長を利用して実際の測定ではなかなか制御しにくいようなパラメータの変化が熱伝達にどのような影響をおよぼすかを知りたいと考えた。

2. 方 法

滴状凝縮現象を観察すると、図1に示すような四つの過程が一つのサイクルをなしていることがわかる。これらの過程の一つ一つにまたそれぞれ複雑な物理現象がともなっているわけであるが、ここではまず第一段階としてこれらの四つの過程を基本とするサイクルを計算機でシミュレートすることを考えた。

図2はシミュレーションのためのフロー・チャートである。

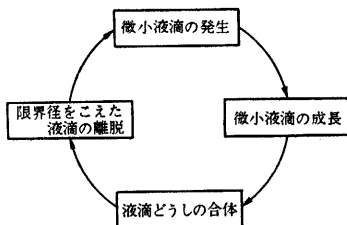


図 1 滴状凝縮のサイクル

凝縮面上の凝縮点(滴の発生点)の位置をきめるには、計算機によって一様乱数を発生させ、これを2個ずつ組にして座標点とする。この各点上に初めはそれぞれ1個ずつの微小液滴が存在し成長を始めるが、その過程で、隣接する発生点との距離によってあるものは互いに接触して合体し、あるものは発生点自体が他の液滴におおわれ、最後にはある限界径をこえて落下する。合体しない液滴の成長速度は

$$\frac{dr}{dt} = \frac{K_0}{2r}$$

$$K_0 = 4.15 \frac{k \Delta T}{\lambda \rho}$$

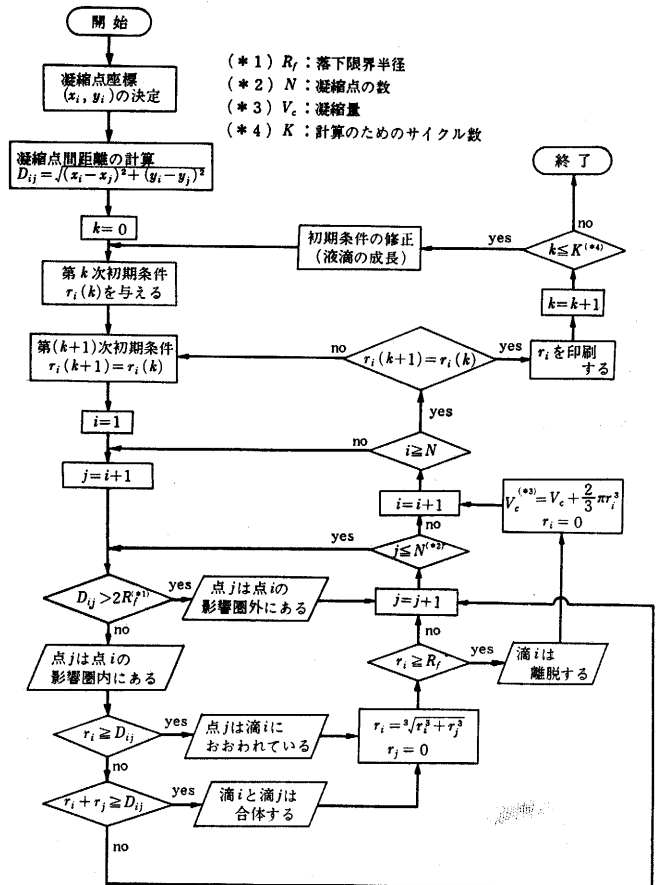


図 2 フロー・チャート

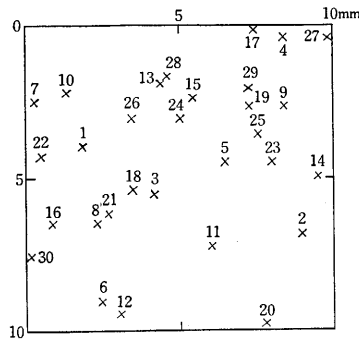
研究速報
 なる半実験式から定める。ここで k は液の熱伝導率、 ΔT は液と蒸気との温度差、 λ は凝縮の潜熱、 ρ は液の密度である。また、落下限界径には実験値を用いる。

3. 結 果

図3は1cm×1cmの凝縮面上に30個の発生点を選んで計算した結果の一部である。この計算では、図3の(a)に示したような分布の発生点上に、初期条件として半径1mmの液滴が存在する状態から出発し、以後1分ごとの液滴径の変化を計算した。落下限界径としては

3.0 mm, また成長速度を定める K_0 の値としては、 $0.314 \text{ mm}^2/\text{mn}$ を用いた (これは $\Delta T=4 \text{ deg}$ に相当する)。

図4は上と同一の計算から得られた凝縮液量、すなわち限界径を越して落下した液滴の体積の時間的変化をプロットしたものである。ごく初期の部分を除いて、凝縮量は時間とともにほぼ直線的に変化しているが、これは



(a) 凝縮点の分布

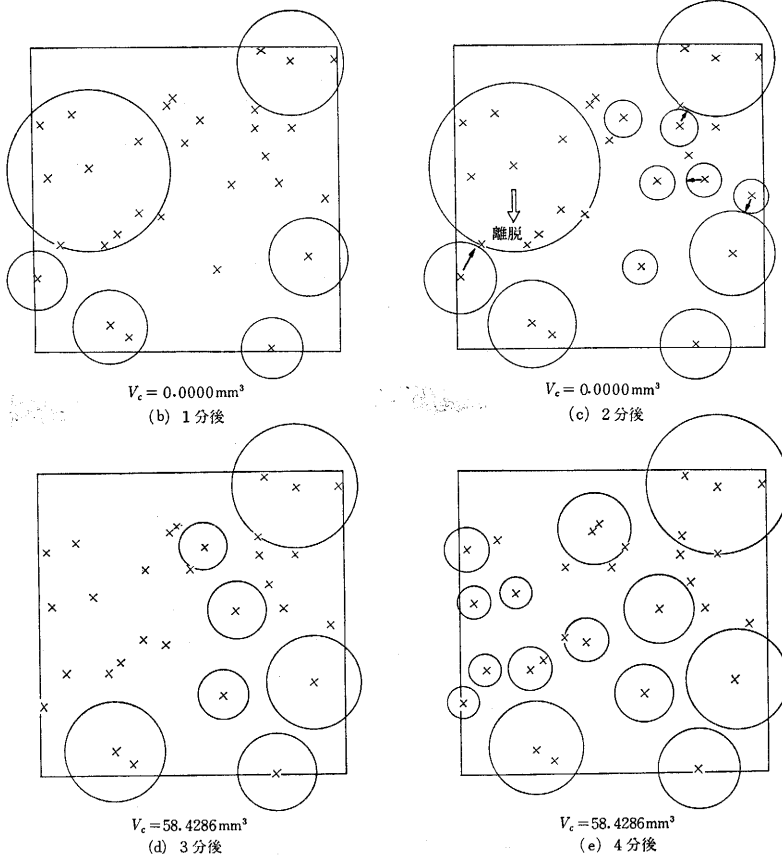


図3 シミュレーションによる液滴径変化の計算結果

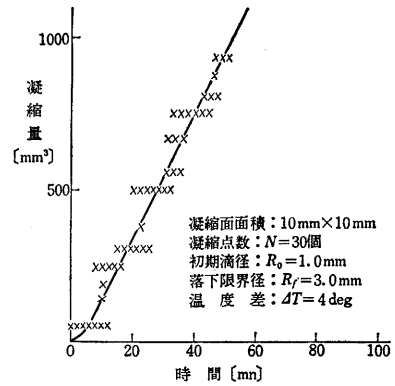


図4 凝縮量の変化

計算のために与えた初期条件の影響が比較的早く消え、定常に近い状態が実現されていることを示すものである。この直線の傾斜から $20.5 \text{ mm}^3/\text{mn}$ の凝縮速度が得られるが、これを熱伝達率に換算すると、約 $1,660 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{deg})$ となる。

4. ま と め

以上述べたような方法を用い、パラメータを適宜変化させて行けばいろいろな条件の下での滴状凝縮過程のシミュレーションを行なうことができる。今後に残された問題は、このシミュレーションにおける各過程の計算法に検討を加え、それを実際の現象にできるだけ近づけることと、得られた結果の適用性を検討することの二つであろうと思われる。

たとえば図3、図4に示した計算結果は、凝縮点の数を 1 cm^2 当たり 30 個として求めたものであるが、実際の滴状凝縮過程においては (p.32 へつづく)

カナダの応用力学会議の中にもあった前記二つの特別講演が企画された理由もなづけるわけで、ここしばらくの間はこの方面の研究に世界の学者の関心が集まるものと思う¹⁰⁾。この Bolotin 旋風で感じたことは、これらの本に限らず、ソビエトで出版された科学技術関係のおびただしい参考書や文献は直ちにアメリカに輸入され、選別されて斬新なものは次から次へとほん訳され、政府出版物として僅か 3 ドル位の値段で研究者の手に入るような態勢になっている。これも宇宙開発を始めとして科学技術の面でソビエトに先んじようとするアメリカの努力の一面を物語るもので、アメリカの研究者はこのようにして世界中の文献を容易に入手でき、ヨーロッパの学界との交流も国内の交流とほとんど変らぬ位活発に行なわれている。かかる研究環境は欧米から遠く離れ、文献の入手も思うように行かない日本の研究環境に比べてまったくらやましい限りであるが、このような意味においても政府の積極的な学術振興政策が熱望される。

固体力学の分野でアメリカにおいて出版されているソビエトの参考書や文献の英訳本には、圧倒的に殻理論の参考書や文献が多く、しかもこれまであまり名前の知られていない人々の手になる本に斬新なものが多いのは、ソビエトの固体力学界が理論解析の面で研究者の層が厚く、またきわめて高度に進んでいることを物語っておりアメリカは有限要素法を始め高度の電子計算機による数値解析法や実験技術でこれに対抗しているのはまことに興味深く感ぜられる。

3. む す び

いずれかの機会に、滞来生活一年間において見聞したことや学界活動の報告を本誌に寄せるつもりではいたが原稿締切まであまり時間をいただけなかったので、十分に材料を整理し文章を推高する暇もなく、筆のおもむくまま一瀉千里に書きなぐり、はなはだまとまりもなく、また、あまり読者に裨益する所の少ない一人よがりの雑文になってしまったことを恐れている。これは一つにかかって筆者の不徳の致すところでお許し願うほかないが、

(p. 39 よりつづく)

3000~4000 個/cm² にもおよぶ凝縮点が観察されている。したがって、計算機の容量の許す限り発生点の数を多くとって計算してみることも必要であろうが、筆者自身は、凝縮量(すなわち凝縮熱伝達率)は凝縮点の数が 1,000 個/cm² を越すあたりから飽和しはじめ、ある程度のところで計算を打ち切ることができるのではないかと予想している。またこの問題とからんで、凝縮面の大きさの選び方が結果に影響を与えるということも考えられるが、これについては適当ないくつかの場合について寸法効果をチェックしておけば十分であると考えている。

またこの方法では、凝縮点の分布はまったくランダム

その責任の一端を出版委員会が負っていただけること期待して筆をおく次第である。

最後に今回の海外出張は、岡本前所長を始め水町教授や第 2 部の諸先生の寛大なご配慮とご厚意により可能になったものであることを記し、深い感謝を捧げるものである。(1968 年 1 月 18 日受理)

参 考 文 献

- 1) K. Washizu, "Variational Principles in Elasticity and Plasticity" to be published by Pergamon Press.
- 2) K. Washizu, "Variational Principles in Continuum Mechanics" University of Washington, College of Engineering, Department of Aeronautical Engineering Report 62-2, June, 1962.
- 3) 川井, 埴他 "平板翼の振動について" 航空宇宙技術研究所報告 TR-30, 1962 年 10 月
- 4) K. Washizu, "Some Consideration on Shell Theory", The Report of Aeroelastic and Structures Research Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Oct., 1960.
- 5) T. Kawai "General Method of Solution for the Responses of Shells Based on Rayleigh-Ritz's Procedure" Civil Engineering Report No. 14, Department of Civil Engineering, State University of New York at Buffalo, Aug., 1967.
- 6) V. Z. Vlasov. "Thin-Walled Elastic Beams", Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem (1961)
- 7) O. C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics", McGraw-Hill Publishing Company, Berkshire, England (1967)
- 8) V. V. Bolotin, "Nonconservative Problems of The Theory of Elastic Stability" Pergamon Press, New York (1963)
- 9) V. V. Bolotin, "Dynamic Stability of Elastic Systems" Holden-Day, San Francisco (1966)
- 10) V. V. Bolotin, "Statistical Methods in Structural Mechanics", Stoi'izdat, Moscow, 1961(1st edition) 1965 (2nd edition); English Translation to be published by Holden-Day, San Francisco (1966)
- 11) G. Herrmann, "Dynamic Stability of Structures", Proceedings of an International Conference held at Northwestern University, Evanston, Illinois, Pergamon Press (1967)

に決められるため、必ずしも実際の伝熱面における分布とは類似でない場合が生ずる可能性もある。しかし数多くの場合について計算を行ない、その結果を平均すれば凝縮点の選び方の問題は考える必要のないものになるであろう。

もし今後この方法による計算が順調に進めば、蒸気の種類によるパラメータの違いや、温度差による成長速度の変化の影響、落下限界径の影響、さらに転落液滴による掃除の効果(すなわち液滴が凝縮面上から転がり落ちるときに、その通路にある液滴を吸収・合体して運んでしまうこと)などを実験によらずに求めることができることになる。(1967 年 12 月 22 日受理)