

「粒状体の力学」シンポジウムと最近の粒状体研究の動向

佐 武 正 雄 (さたけ まさお)

東北学院大学教授 工学部, 粒状体力学に関する国内委員会委員長

1. まえがき

「粒状体の力学」シンポジウムが, 1993年12月, 仙台で開催された。この報告は, このシンポジウムと粒状体力学に関する国内委員会が編集発刊した解説書「粒状体の力学」, さらに粒状体力学に関して開催された二つの国際会議など, 最近の研究の動向について紹介する。

2. 解説書「粒状体の力学」

粒状体力学に関する国内委員会(以下単に委員会)は, 国際土質基礎工学会 (ISSMFE) の中に1985年に設置された13番目の TC, Technical Committee on Mechanics of Granular Materials (略して TC 13) の活動を支援するために, 土質工学会に設けられた委員会である。TC 13は, 粒状体力学について4回の研究集会を開いたほか, State-of-the-Art リポート¹⁾を, 1989年リオデジャネイロの会議において発刊している(なお, その補足版²⁾もニューデリーの会議で頒布された)。

粒状体は土や砂を粒の集まりとして理想化した力学モデルである。したがって, 粒状体の力学は土質力学の一つの基礎をなすものであるが, 材料科学における最近のマクロメカニクスの進展に伴って, 新材料, 機械, 金属, 化学工学などの工学分野でも, その応用が注目されるようになってきた。しかし一方, 粒状体は従来の連続体力学では扱えない複雑な特性をもち, 力学的構成においても多様なアプローチがあって, 未だ学問体系として十分に整備されているとは言い難い。また, 粒状体の力学をまとめた文献(特に日本語のもの)も多いとはいえない^{3)~5)}。したがって, 粒状体の力学は土質工学の一般の研究者, 技術者にとっては, 取り付きにくく, また応用

しにくい面をもっていたように思われる。

このような現況を考え, 「粒状体の力学」について, 一般の研究者, 技術者向けの解説書をつくるのが委員会で企画された。本書は, 1990年3月に開かれた第7回委員会で提案されて以来, 本の内容, 項目の分類, 執筆担当者などについての審議を重ね, 1993年10月に刊行された。この解説書⁶⁾は, 五つの章(基礎となる数学・力学, 粒状体力学の基礎事項, 構成則, 粒状体の種々の力学挙動, 数値解析とシミュレーション)の中に, 57の項目を設けて項目ごとの解説を行っている(詳細な内容は, 本誌1, 2月号カラー広告のページに記載されているので省略する)。本書は一応体系的に配列されているが, 項目ごとに独立に読むことも可能で, それぞれ関連項目が示されている。粒状体はその離散性, 粒子性が基本であるので, そのための数学・力学の記述に1, 2章があてられている。第3章は粒状体に適用される(連続体力学的)弾・塑性論の解説であり, 第4章は流れ, 液状化, せん断帯の形成といった粒状体の特徴的力学現象の解析について説明している。第5章は, 最近発展のめざましいコンピューターによる数値解析, シミュレーションの手法について紹介している。

3. 「粒状体の力学」シンポジウム

解説書「粒状体の力学」の発刊に際して, その内容を紹介する現況報告, さらに一般公募による研究発表も加え, 2日間にわたる「粒状体の力学」シンポジウムが計画され, 次のような内容で行われた。

日時: 1993年12月2~3日

場所: 東北大学工学部青葉記念会館

・セッションI: 粒状体のマクロメカニクス

現況報告 小田匡寛(埼玉大学), 研究発表7編

学会活動から

・セッションⅡ：粒状体の連続体理論

現況報告 橋口公一 (九州大学), 研究発表 7 編

・特別セッション：関連分野における最近のトピックス, 粉体成形における粒状体モデリング

相沢龍彦, 田村茂之 (東京大学)

・セッションⅢ：粒状体の流れと液状化

現況報告 1 橋本晴行 (九州大学), 現況報告 2 東畑郁生 (東京大学), 研究発表 4 編

・セッションⅣ：変形の局所化と不安定

現況報告 岡 二三生 (岐阜大学), 研究発表 7 編

・セッションⅤ：粒状体の数値シミュレーション

現況報告 岸野佑次 (東北大学), 研究発表 6 編

シンポジウムのセッションは, 前記の解説書の内容にほぼ対応しており, 解説書の編集において各章の主査を務められた委員が現況報告を担当した。また関連分野の最近のトピックスとして, 東京大学金属工学科の相沢研究室で行われている粉体成形における粒状体モデリングの応用について, 興味深い研究紹介が行われた。

シンポジウムは 2 日間にわたって開催され, 約 80 名の参会者によって熱心な発表・討議が行われた。また, 2 日目の夜には懇親会が催され, 粒状体研究の話の環が広げられた。

今回のシンポジウムでみられるように, 粒状体の力学について, 理論の基礎が次第に固められてきたこと, また流れや変形の局所化について, 実現象と理論やシミュレーションとの対応が入念に検討され, アプローチの理論が定着してきたことなどが注目される。一方, コンピューターシミュレーションの手法も改良が加えられ, 粒状体の力学特性の解明に大きい役割を果たしてきたばかりでなく, 土質工学を含む広い工学分野への応用が急速な進展をみせている。また, このことが粒状体力学の基礎研究を推進する大きい力になっていることも見逃せない。

このシンポジウムの発表論文についても, 論文集⁷⁾が出版されている (その詳細についても, 本誌 1, 2 月号カラー広告欄参照)。

4. 粒状体力学に関する国際学会, 国際会議の動向

粒状体の力学に関する関心は, 学際的にまた国際的にも高くなっている。ここでは, その代表的な二



写真-1 日米セミナーであいさつされるクラークソン大学学長の Gallagher (ギャラガー) 教授

つの活動, 粒状体力学に関する日米セミナーとフランスの研究者を中心とする国際学会とその活動の国際会議について簡単に紹介する。

4.1 粒状体力学に関する日米セミナー

粒状体力学に関する国際的活動の草分けは, 1978 年仙台で行われた「粒状体の連続体力学・統計手法によるアプローチ」に関する日米セミナー⁸⁾であると思う。この日米セミナーは, その後, 主題を変えてほぼ 4 年ごとに, コーネル大学 (1982)⁹⁾, 東北大学 (1987)¹⁰⁾, クラークソン大学 (1991)¹¹⁾と既に 4 回開催されている。1991 年, 米国ポツダムのクラークソン大学で開かれた日米セミナーは, 同大学の H. H. Shen (シェン) 教授が世話をされ, 「粒状体のマイクロメカニクス」をテーマとして行われた。正参加者は日本 9, 米国 10, オブザーバーは日本 8, 米国 16, カナダ 3, フランス 3, ハンガリー 2 名であった。

仙台で行われた第 1 回の日米セミナーの折, チューレン大学 (当時) の S. C. Cowin (カウイン) 教授は, “粒状体において, 間隙率に次ぐ第 2 の測度は何か” という問題を提起された (Cowin 教授は, 間隙率を考慮した粒状体の流動の理論で有名)。その後, ファブリックテンソルが粒状体の異方性を記述する新しい測度として登場し¹²⁾, 今では岩盤を含む地盤材料に広く応用されている。しかし, 粒状体の基本測度は, 間隙率, ファブリックテンソルだけで十分とはいえない?。では, さらに次にキーになる第 3 の測度は何か。これがクラークソン大学の日米セミナーで行われた議論の底にある一つの基本課題

であったように思われる。会議の主題が微視的立場からのアプローチ，すなわちマイクロメカニクスにしぼられたのも，この方向に合致していたように思う。粒状体の流れの解析では，“粒状体の温度”という量が一つの基本量として導入されている。準静的問題でも，粒状体のもつ不規則性，不均一性について論議されたが，空隙率やファブリックテンソルのような平均量でなく，分散・偏差を示す量の導入に関する研究が今後の課題ではないかと感じられた。

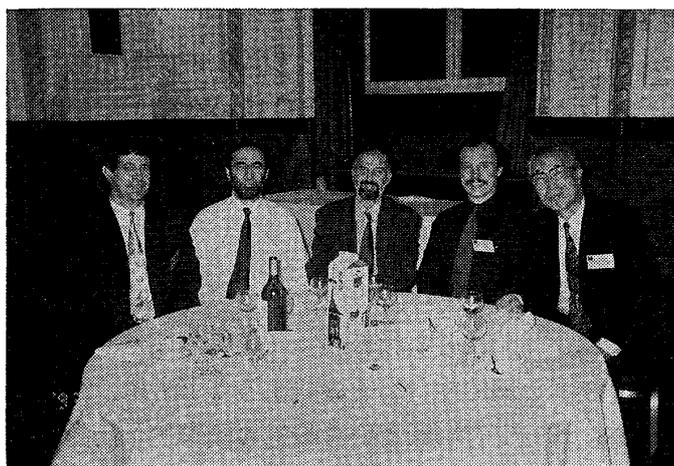
クラークソン大学の日米セミナーの成果は，Elsevier 社から発行されているプロシーディングス¹¹⁾のほか，正参加者の一人 Nemat-Nasser (ネマナッサー) 教授が主編集者である “Mechanics of Materials” の特集号¹³⁾としても刊行されている。

粒状体力学に関する日米セミナーの次の開催は1995年日本の予定であり，小田匡寛教授(埼玉大学)を中心に計画が進められている。

4.2 A.E.M.M.G. と国際会議 Powders & Grains 93

1993年7月12～16日，英国バーミンガムのアストン大学において，第2回粒状体のマイクロメカニクスに関する国際会議（略称：Powders & Grains 93）が開催された。オーガナイザーはアストン大学の C. Thornton (ソーントン) 博士 (TC 13 のメンバー) であるが，この会議は AEMMG (Association pour l'Etude de la Micromécanique des Milieux Granulaires) の行事であり，まずこの学会について紹介したい。

AEMMG は，フランスにおける粒状体の力学（特にマイクロメカニクス）の研究者を主体として，1987年に組織された学会で，Roland Gourvès (グループ) 教授 (Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand II, Laboratoire de Génie Civil (CUST), Rue de Meuniers BP 206 63174 Aubiere Cedex, France, FAX : 73407510) が代表者であり，活動として，研究紹介誌 “poudres & grains” を発行している（入会希望の方は，直接 Gourvès 教授に申込みたい）。この学会の主催で1989年，クレルモンフェランで第1回の国際会議¹⁴⁾が開催され，日本からも小田教授らが参加されている。今回は2回目であるが，日本からは約20名の参加があり，前回から



写真—2 AEMMG の関係者（左端が代表の Gourvès 教授）

みれば，人数も急増し，土質以外の方の参加も多かった。

会議の内容は，次のセッションの分類によく表されている。

1. Packing geometry	3 編
2. Particle interactions	7
3. Quasi-static deformation	17
4. Powder compacts	5
5. Vibrating beds	5
6. Rapid granular flow	8
7. Avalanches	5
8. Hopper flow	5
9. General flow problems	9
10. Miscellaneous	11

内容は多岐にわたっているが，プロシーディングスの序に Thornton 博士が述べているように，これらを独立した分野としてみるのではなく，全体を関連づけてみることによって，粒状体の広い挙動について深い理解が得られるように思われる。会議はエキスカッションを含め5日間にわたって行われたが，上のような主旨で，熱のこもった討議が続けられた。他分野の粒状体の研究者の知己がふえたことも得難い成果であったと思う。この会議のプロシーディングス¹⁵⁾は Balkema 社から既に発刊されている。

AEMMG はヨーロッパを中心とした組織であったが，この国際会議を機会に，実質的な国際学会にしたいという空気が盛り上がり，その組織づくりについても議論された。差し当たり，参加者の多かった日本と米国に連絡者（または連絡機関）を置き，活動を推進することが決定された。また，次回は4

学会活動から

年後米国で開催の予定である。

なお、この国際会議の際に、TC 13 の集会ももたれたが、このことについてはTC 13 の活動として別に(本誌7月号 XIII ICSMFE 報告の中で)報告する。

5. あとがき

本文は、昨年12月に行われた「粒状体の力学」シンポジウムの経緯や内容を報告するとともに、粒状体力学に関して行われている最近の国際的な活動について紹介した。

なお、粒状体に関する新しい研究活動の一つとして「土と岩の変形の局所化と分岐に関する国際ワークショップ」が挙げられるが、これに関しては本誌2月号に掲載された報告¹⁶⁾を参照されたい。

本文が、粒状体の力学について関心をもっておられる多くの方々に、少しでも役に立つ情報となれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) ISSMFE Technical Committee on Mechanics of Granular Materials: Mechanics of Granular Materials, 土質工学会, 1989.
- 2) ISSMFE Technical Committee on Mechanics of Granular Materials: Mechanics of Granular Materials Supplementary Volume, 土質工学会, 1994.
- 3) 最上武雄: 粒状体の力学, 土質力学(最上武雄編), 技報堂, pp. 893~1036, 1969.
- 4) Shahinpoor, M.(ed.): Advances in the Mechanics and the Flow of Granular Materials, Vol. 1, 2, Trans. Tech. Publications, 1983.
- 5) Kandaurov, I. I.: Mechanics of Granular Media and Its Application in Civil Engineering, A.A. Balkema, 1991.
- 6) 粒状体力学に関する国内委員会: 粒状体の力学, 土質工学会, 1993.
- 7) 粒状体力学に関する国内委員会: 粒状体の力学シンポジウム発表論文集, 土質工学会, 1993.
- 8) Cowin, S.C. and Satake, M. (eds.): Continuum-Mechanical and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials, 学術文献普及会, 1978.
- 9) Jenkins, J.T. and Satake, M. (eds.): Mechanics of Granular Materials—New Models and Constitutive Relations, Elsevier, 1983.
- 10) Satake, M. and Jenkins, J.T. (eds.): Micromechanics of Granular Materials, Elsevier, 1988.
- 11) Shen, H.H. et al. (eds.): Advances in Micromechanics of Granular Materials, Elsevier, 1992.
- 12) Oda, M., Nemat-Nasser, S. and Mehrabadi, M.M.: A statistical study of fabric in a random assembly of spherical granules, Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 6, pp. 77~94, 1982.
- 13) Mechanics of Materials, Vol. 16, Nos. 1-2 (Special Issue on Mechanics of Granular Materials), Elsevier, 1993.
- 14) Biarez, J. and Gourvès, R. (eds.): Powders and Grains, A.A. Balkema, 1989.
- 15) Thornton, C. (ed.): Powders & Grains 93, A.A. Balkema, 1993.
- 16) 岡二三生・龍岡文夫: 第3回土と岩の変形の局所化と分岐に関する国際ワークショップ報告, 土と基礎, Vol. 42, No. 2, pp. 57~58, 1994.