Ruhr-Universität Bochum・AIBにおける風工学研究 Wind Engineering Studies at AIB, Ruhr-University Bochum

植松 康*
Yasushi UEMATSU

1. はじめに

筆者は、平成7年度文部省派遣在外研究員として、1996年3月～8月の6ヶ月間、カナダおよびドイツの2ヶ国に滞在する機会を得た。このうち、7、8月の2ヶ月間滞在したのが、ドイツのRuhr-Universität Bochumであり、Aerodynamik in Bauwesen (以下、AIBと呼ぶ)のNiemann教授にHost Professorをお願いした。折しも、筆者の滞在期間中に、米国・BlacksburgにおいてBBAAⅢ (Third International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Its Applications)が開催され、次回(BBAAⅣ)はNiemann教授がChairmanとなって西暦2000年にBochumで開催されることに決定したとのことである。この会議には、これまでと同様、日本からも多くの人が参加されることと思う。Niemann教授はヨーロッパにおける風工学研究のリーダーであり、その業績については改めて述べるまでもなからう。ところが、これまでBochumで風工学関係の国際会議が開催されることがなかったということもあり、日本からRuhr-Universität Bochumを訪れた人の数は少なく、AIBが本誌で紹介されることもなかった。実際、筆者自身ごく最近までBochumがどこにあるのかさえ知らなかった程である。そこで、ここに2ヶ月間滞在した者の責任として、また、BBAAⅣに参加を予定されている読者に多少の基礎知識を持って頂くため、AIBの実験施設や、ここでの最近の研究について簡単に紹介したいと思う。

2. Ruhr-Universität Bochum および AIB の概要

Ruhr-Universität Bochumは、その名が示す通り、ドイツ北西部ルール地方に位置する人口約30万の都市Bochumにある(Fig. 1参照)。ルール地方と言えば、

Fig. 1 Ruhr-Universität Bochum の位置
(Location of Ruhr-University Bochum)

* 東北大学工学研究科都市・建築学専攻助教授 工博
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Urban Planning and Building Engineering, Tohoku Univ., Dr. Eng.
(原稿受理: 平成8年9月20日)

Photo. 1 Ruhr-Universität Bochumのキャンパス
(General view of Ruhr - University Bochum)

古くから鋳工業が栄え、ルール工業地帯として世界的にも有名である。ところが、驚いたことに、1960年代に至るまで、この地方には大学 (Universität) が1つもなかったのである。Ruhr-Universität Bochumは、このような状況を解消し、新しい時代の要求に応えるべく、1962年に設立された。キャンパス計画は大規模なコンペによって決まったとのことで、建物のデザインも統一されたものとなっている (Photo. 1)。ドイツで最も古い大学と言えば、1386年に創立され、実に600年以上の歴史を持つハイデルベルク大学である。それから見ればRuhr-Universität Bochumは生まれたての赤ん坊のようなものであろう。しかし、現在では、約38,000人の学生を抱え、ドイツ北西部における重要な教育・研究拠点となっている。規模の面から言えば、ドイツ国内8大学の1つに数えられている。余談ではあるが、ドイツの大学は全て公立であり、授業料はどこでもタダである。また、大学間の格差はない。従って、どの大学に入った (あるいは卒業した) かは問題ではなく、何を専攻している (あるいは専攻した) か が重要であるとのことである。

Ruhr-Universität Bochumの組織は、日本の標準的な大学とはかなり異なっており、日本式の「工学部」 (あるいは「理工学部」) のような大きな組織はなく、Bauingenieurwesen (Civil Engineering, あるいは建設工学) が1つのFakultät (学部) となっている。Fakultätは3つのInstitut (日本式に言えば、学科あるいは研究所に相当すると思われる) から構成され、AIBはInstitut für Konstruktiven Ingenieurbau (Institute of Structural Engineering) に属している。このInstitutには全部で10個のArbeitsgruppe (研究室) がある。それぞれのArbeitsgruppeには1人の教授が

いるだけで、助教授や講師といったポストはない。AIBにおける教育・研究は、Niemann教授の他、数名 (筆者が滞在していた時には、7名) の助手が担当している。但し、助手といっても、日本の大学のように「助手」という役職 (職名) がある訳ではない。Niemann教授以外は、大学のpermanentな職員ではなく、給与も大学外の学術振興会や財団等から支払われている。従って、採用には当然期限 (通常4年程度) が設けられている。期限内に一定の成果が要求されるので、また、それらの成果を基に学位論文を作成してDr.-Ing. (工学博士に相当) の学位を取得することも多いので、研究のポテンシャルは非常に高いといえる。

3. 実験施設

風洞はFig. 2及びPhoto. 2に示すように、幅1.8m、長さ9.4m、高さ1.6~1.9m (可変) の測定部をもつ吸い込み式の境界層風洞である。一様流の時の最大風速は30m/sである。1976年に建設されたとのことであるから、今年 (1996年) 成人式を迎える計算になる。しかし、メンテナンスが非常に良く為されているので、駆動モーターの騒音が若干大きいことを除けば、最近建設されるこの種の風洞と比べても遜色がない。この風洞は、9階建RC造建物 (Photo. 1において左から3番目の建物) の地上3階にある一室に設置されているので、床の振動対策にはかなり気を使っている。例えば、送風機および駆動モーター部分には、二重の免震機構が採用されている。それでも、階下が事務室になっているため、配置転換や新規採用で新しい人が来た折りなどには、苦情が出ることもあるそうである。また、Fig. 2やPhoto. 2からも感じられるように、測定部は、断面積の割に長

Fig. 2 Ruhr-Universität Bochum の境界層風洞の概要
(Boundary layer wind tunnel of Ruhr-University Bochum)

Photo. 2 Ruhr-Universität Bochum の境界層風洞
(Boundary layer wind tunnel of Ruhr-University Bochum)

さが短い。これは、しばしば経験するように、既存の建物の中に風洞を建設する場合の宿命と言えよう。幸い、吸い込み口側の壁の外側が比較的広いバルコニーとなっているので、測定洞にもう1つモジュールを追加して全体を長くすることも可能であり、現在検討中とのことである。更に、測定部の断面も、ブロックージュのことを考えると、必ずしも十分とは言えないので、Parkinsonの提案した tolerant wind tunnel (参考文献 [1] 参照) への改造も現在計画しており、理論的な検討は既に終了したということである。測定部が比較的短いということもあり、ラフネスブロックだけを用いた場合、床面上に発達する境界層の厚さは、ターンテーブル位置で 0.4m 程度にしか達しない。従って、もっと厚い境界層を生成する際には、Counihan 型のスパイヤーを使用し

ている。これによって得られる境界層は、厚さが最大 1.2m 程度、幾何学的縮尺率 $1/1000 \sim 1/200$ 程度のものである。吹送距離が短い場合、ラフネスブロックを規則的に配置すると、その規則性の影響が、ターンテーブル位置での風速分布（特に、気流直角方向分布）に現れてしまうことはよく経験することである。このような不都合をなくするため、AIB ではランダムラフネスについて検討している (Photo. 3)。これは、建物密度を与え、ラフネスブロック（ここでは正方形断面のものを使用）の高さ、向きおよび位置を、モンテカルロシミュレーションで決定して配置するというものである。筆者の滞在中には、未だ所望の性能が得られず、いろいろと検討している最中であった。尚、このランダムラフネスは、Virginia Tech 大学の Tieleman 教授が AIB を訪れた際に残していった suggestion であるとのことである。

計測機器としては、多チャンネル熱線風速計、多チャンネル風圧計、六分力計等、標準的なものは整備されている。但し、風圧計については、最近日本の企業で普及してきたような数百チャンネルというようなものではなく、40 チャンネル程度のものである。やはり大学の研究室の経済状況は、日本と比べて、それほど大差ないのであろう。しかし、限られた設備の中で、いろいろ工夫しながら、最大限の情報を得るための努力は惜しんでいない。例えば、Photo. 4 の左上に見られるサッカー場スタンド屋根の風による動的応答とその荷重評価も、このように限られた設備を用いて検討されたものである（詳細については、参考文献 [2] 参照）。Photo. 5 は、六分力計に円筒モデルをセットしたものである。こ

Photo. 3 ランダムラフネスによる乱流境界層の生成
(Generation of turbulent boundary layer by using random roughness)

Photo. 5 六分力計と円筒モデル
(Force balance and a cylinder model)

Photo. 4 各種屋根の風洞実験模型
(Wind-tunnel models of several roofs)

の六分力計も研究室で製作されたものであり、十分な精度での計測が可能である。風洞実験室には、専属の技術職員が常時2名いて、風洞実験模型の製作や計測を担当している。実験に使うほとんどの模型は勿論、計測器も原理が簡単なものであれば、時間の許す限り何でも自分達で作製すると言っていた。技術職員が一人もいない筆者の研究室の状況と比べると雲泥の差であり、何とも羨ましい限りである。筆者の研究室の状況（恐らく、日

本の大学ならばどこでもそれほど大差はないと思われる）をNiemann教授に話したら流石に驚いていた。

更に、現在独自のPIVシステムを開発中であり、物理学（もっと厳密に言えば天文学）出身の助手が担当している。彼は修士論文において、画像処理技術を応用して、天の川にある天体の運動を解析した（参考文献 [3] 参照）。今度はその技術を更に発展させ、物体まわりの流体の運動を解析しようというものである。既に、DANTECなどはPIVシステムを市販しているが、価格が非常に高く、大学の研究室の予算ではなかなか手が出ない。そこで、あまりお金をかけずに、且つ、自分達の目的に応じた使い易いシステムを開発したいという要望からこのプロジェクトに着手したとのことである。まだ開発中であるから、あまり大きな声で言うとは叱られるかも知れないが、このシステムのユニークな点は、① Image amplifierを利用することにより、小出力（100～150mV）のレーザーシートでも十分であること、② カメラからの出力を直接コンピュータのメモリに取り込むことにより、迅速な処理が可能になること、および、③複数のレーザーシートを用いることによって、particleの3次元的な動きを捉えることができること、等である。理論的なことや技術的なことを細かく話してくれたが、残念ながら筆者の理解の枠を超えていた。

AIBでは、風洞実験の他に、タワーなどの実大構造物の風応答観測も行っている。実測においては、風向・風速や風圧力の測定は比較的簡単にできるが、歪の測定は

Photo. 6 歪拡大装置
(Devise for magnifying strain)

なかなか容易ではない。それは、構造物表面に通常の方法で歪ゲージを貼った場合、強風中であっても発生する歪のレベルが非常に小さいため、出力がノイズに埋もれてしまうからである。Photo. 6は、クーリングタワーの風応答観測において、SN比の大きい測定を行うために考案された装置（勿論、これも研究室で製作されたもの）であり、一種のメカニカルな歪拡大装置といえよう。機構的には至って簡単であり、2つの剛な部分を薄くて柔らかい板で繋いだけである。剛な部分をクーリングタワーの表面に固定すると、これらは、シェル面の変形に応じて変位し、これらを繋いでいる柔らかい板に伸縮変形をもたらす。この時の歪はシェル面に実際に発生する歪より1オーダー大きくなるため、より精度の高い測定が可能になるのである。

4. 風工学研究

Niemann教授と云えば、クーリングタワーに代表される円筒形構造物の耐風性に関する研究で有名である。歴史を重んじるヨーロッパでは、北米など他の地域と異なり、超高層建築は伝統的に好まれないようである（因みに、ヨーロッパで最も高い建物は、ドイツのフランクフルトにある地上70階、高さ256mのメッセタワー）。従って、超高層建物の耐風性は現実的な研究課題にはなかなかないといえよう。一方、ドイツ国内を旅行すると、クーリングタワーやテレビ塔と言った高い円筒形構造物をよく目にする。言わずもがな、これらの構造物は風の動的作用に対して敏感であり、耐風性が設計上最も重要な課題である。AIBにおける研究もこのような現実的な社会（産業界）の要求に応えるものと言えよう。

Photo. 7 クーリングタワーの空力弾性模型
(Aeroelastic models of cooling towers)

最近数年間における主な発表論文の一覧を付録に示す。詳細については、それぞれの論文を読んで頂くとして、ここでは筆者の興味を引いたものを中心に、いくつか概要を紹介する。

(1) クーリングタワーの耐風性に関する研究

やはり何と言ってもAIBにおける研究の中心課題はクーリングタワーである。Photo. 7は3種類の風洞実験模型を示す。中央の小さい模型は、高さ100m程度の現存するクーリングタワーの弾性模型である。模型材料は、靴底に使うゴムの一種である。この程度の規模のクーリングタワーでは、動的応答における共振成分の影響は小さく、準静的な応答評価が可能である。従って、この模型では幾何学的相似の他、弾性パラメータの相似のみを確保している。模型表面にある縦方向のリブは、風洞実験において、極超臨界流れをシミュレートするためのものである（参考文献[2]参照）。模型表面（表、裏の両方）に数箇所歪ゲージが貼られている他、多数の圧力測定孔も設けられており、歪と圧力の同時計測を行い、歪が最大となるときに圧力分布に基づいて設計荷重（等価静的荷重）を決めようというものである。また、このクーリングタワーに関しては、風洞実験結果と実測結果との対応も検討されている。Photo. 7に見られる2つの大きな模型は、高さが200mを超える大型クーリングタワーの模型であり、現在様々な側面からの検討が為されている。このように大規模なクーリングタワーになると、動的応答における共振成分の影響が大きくなることが予想され、設計においてその影響を適切に考慮しなければならない。1つ（右側）は、小型のクーリングタワーと同様、弾性パラメータの相似のみを満足させ

たものであり、他（左側）は、質量パラメータと減衰パラメータの相似も確保した完全な空力弾性模型である。この模型の材料は、DEVCONというエポキシ系樹脂に鉄粉を混入したものである。尚、減衰定数は、1.5%程度である。模型表面には、歪みゲージが貼られており、気流中での応答を計測して耐風性を検討する。クーリングタワーは、回転対称体であるが、風圧力は非対称分布を示すので、シェル面には面内歪の他に曲げ歪も発生する。これらを分離するためには、表・裏の両面に歪ゲージを貼らなければならない。Niemann教授の話では、この実験の困難な点の1つは、計測された歪に含まれる温度変化の影響をいかに補正するかということである。即ち、実験中における気流温度の変化の他、表と裏の気流性状の違いによる熱伝達特性の違いも影響し、これらによる出力の変化量が本来計測される値と同程度あるいはそれ以上になってしまうからである。

(2) 石油タンクの座屈に関する研究

オープントップの石油タンクが、空あるいはそれに近い状態で強風を受けるとシェル面が座屈して崩壊に至る可能性がある。従って座屈発生の限界風速および座屈後の挙動（最終耐力など）の把握は、石油タンクの耐風設計上重要な課題である。AIBでは、この問題に対し、実験的研究を行っている（参考文献[4]参照）。Photo. 8は風洞実験模型である。シェル面は、厚さ0.1mmのプラスチックシート（Mylar foil）を丸めて作製したものであり、上端は剛なアルミニウム製のリングで補剛されている。シェル部分の半径と厚さの比は2225と大きい。筆者らも以前類似の問題を扱ったことがあるが、筆者らの研究対象は鋼製サイロであったため、上部は閉じられていた。従って、非接触型変位計を模型の内部に設置し、内部からシェル面の変形を測定することができた。しかし、オープントップの場合、そのような計測はできないため、AIBではレーザーシートを用いた変位測定を行っている。即ち、シートを水平に（シェル面を輪切りにするように）当て、輪切りにされた断面を風洞上に設置されたカメラで撮影し、それを画像解析して各瞬間における変形を求めるのである。Fig. 3はそうにして得られたいろいろな高さでのデータを基に、座屈後平衡形状を透視図で表現したものである。

(3) その他の研究

上述した円筒形構造物以外にも、風による動的応答およびその荷重評価に関して、実験的、解析的研究が行わ

Photo. 8 オイルタンクの空力弾性模型
(Aeroelastic models of an oil-storage tank)

Fig. 3 オイルタンク模型の座屈後平衡形状
(Post-buckling configuration of an oil-storage tank model)

れている。主なものを挙げると、

- ①サッカー場スタンド屋根等、大空間構造物の耐風設計
(Photo. 4)
- ②高層鉄塔のガスト応答
(ガスト影響係数の鉛直分布に着目)
- ③高層建築物と気流との相互作用
(解析的研究および数値シミュレーション)
- ④低層建築物の設計用風荷重
(弾塑性応答や疲労も考慮)

ドイツでは、環境問題に関する関心が非常に高く、また、いろいろな規則も厳しい。例えばゴミの出し方にしても、かなり細かく分類されている。AIBで取り組んでいる環境問題に関する研究テーマを挙げると、

- ①車の排気ガス等汚染物質の拡散の問題
- ②高速道路からの騒音の伝搬と遮音の問題
などである。

5. おわりに

本稿は、筆者がRuhr - Universität Bochum滞在中、Niemann教授を初めとするAIBのスタッフから得た情報に基づいて執筆したものである。若いスタッフを中心に興味深い研究が多く為されており、もっと詳しく紹介したかったのであるが、紙面の都合で概要のみに留めざるを得なかった。尚、これらのうちのいくつかについては、参考文献 [2] にいくらか詳しく説明されている。実験施設や研究内容について更に詳しく知りたい方は、Niemann教授に直接尋ねられたい。住所を以下に示す。

Prof., Dr.-Ing., H.-J. Niemann
Arbeitsgruppe Aerodynamik in Bauwesen
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstraße 150
D-44780 Bochum
Germany

参考文献

- 1) G. V. Parkinson and M. Hameury, Performance of the Tolerant Tunnel for Bluff Body Testing, 日本風工学会誌, 第37号, 昭和63年, 10月, pp.11-18.
- 2) H. J. Niemann, The Boundary Layer Wind Tunnel: an experimental tool in building aerodynamics and environmental engineering, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 48, 1993, pp. 145-161.
- 3) Görnandt, Untersuchungen zur Methodik der Flächenphotometrie für Kugelspiegelkameras mit Großen Bildwinkeln, Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1991.
- 4) H. J. Niemann, M. Kasperski and V. Görnandt, Thin-walled shells subjected to wind loading, Final Report, Enhancement of ECCS Design Recommendations and Development of Eurocode 3 parts related to shell building, March 1996.
- 5) H.-J. Niemann, W. Brilon and E. Romberg, Wind tunnel experiments on spread of exhaust in the vicinity of motorways, Proceedings of the 14th APRB Conference, Part 3, 1988.
- 6) H.-J. Niemann and W. B. Kräzig, Recent results on the safety and reliability of cooling tower shells under wind-induced vibrations, Proceedings of 10 Years of Progress in Shell and Spatial Structures, IASS, Madrid, 1989, Vol. 1.
- 7) H.-J. Niemann and M. Kasperski, The assessment of wind loads on cooling towers, Proceedings of International Symposium "Experimental Determination of Wind Loads on Civil Engineering Structures", New Delhi, 1990, Oxford & IBH Publishing Co. PVT. Ltd.
- 8) H.-J. Niemann, Dynamic response of cantilevered structures to wind turbulence, Proceedings of the European Conference on Structural Dynamics, Bochum, 1990, A. A. Balkema, 1991.
- 9) H.-J. Niemann and N. Hölscher, Multiple aerodynamic pressure admittance - concept and related experiments -, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 41-44, 1992.
- 10) H.-J. Niemann, N. Hölscher, R. Höffer, W. Brilon and E. Romberg, Wind tunnel experiments on micro-scale dispersion of exhaust from motorways, The Science of the Total Environment, Vol. 134, 1993.
- 11) H.-J. Niemann and M. Kasperski, Man induced vibrations of a stand structure, Proceedings of the 2nd European Conference on Structural Dynamics, Trondheim, 1993, A. A. Balkema, 1993.
- 12) H.-J. Niemann and R. Höffer, Computation of artificial stochastic wind loads and interaction forces on oscillating line-like structures, Proceedings of the 2nd European Conference on Structural Dynamics, Trondheim, 1993, A. A. Balkema, 1993.

付録 AIBにおける最近の主な発表論文

- 1) H.-J. Niemann, Loads and response of a cantilevered roof due to wind turbulence, Preprints of the 7th International Conference

- 10) M. Kasperski and H.-J. Niemann, Ground level winds and pedestrian comfort, Proceedings of the 1st European and African Regional Conference on Wind Engineering, Thomas Telford, 1993.
- 11) H.-J. Niemann, R. Höffer and J. X. Lou, Modeling of artificial stochastic wind loads and interaction forces on oscillating line-like structures, Proceedings of the 6th International Conference on Structural Safety and Reliability, 1994, Balkema-Verlag.
- 12) H.-J. Niemann and N. Hölscher, Turbulence and separations induced pressure fluctuations on a finite circular cylinder. Application of an unsteady strip theory, EECWE'94, Warsaw, 1994.
- 13) H.-J. Niemann and R. K. Garg, On three dimensionality of fluctuating dynamic forces on circular cylindrical structures, Proceedings of the 9th International Conference on Wind Engineering, New Delhi, 1995.
- 14) M. Kasperski, R. K. Garg and X. J. Lou, Some features of modeling spectral characteristics of flow in boundary layer wind tunnels, Proceedings of the 9th International Conference on Wind Engineering, New Delhi, 1995.
- 15) M. Kasperski, H. Koss and J. D. Holmes, Limit state design of low-rise portal frames using wind tunnel tests, Proceedings of the 9th International Conference on Wind Engineering, New Delhi, 1995.
- 16) M. Kasperski and J. D. Holmes, Optimized design of a low-rise industrial building for wind loads, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 57, 1995.