

建築物等の被害調査結果に基づく津波荷重の評価 その2 抗力式に基づく検討

2011年東北地方太平洋沖地震 津波 津波避難施設
設計用津波荷重

正会員 ○浅井 竜也*¹ 同 舘野 公一*²
同 中埜 良昭*³ 同 福山 洋*⁴
同 芳賀 勇治*⁵ 同 菅野 忠*⁶
名誉会員 岡田 恒男*⁷

1. はじめに

前報(その1)では、津波荷重として静水圧と同様の三角形の波圧分布を仮定して検討を行った。同式は、陸上など水が無いところに来襲した津波による衝撃波力を考慮した式である。しかし、2011年東北地方太平洋沖地震による津波では、ゆっくりと浸水深が上昇して構造物が徐々に波に浸かり、衝撃波力というよりは抗力が構造物に作用しているような記録映像が多く見られた。そこで、抗力式による津波波力の検討を行い、(その1)の結果と比較を行った。

2. 抗力に基づく津波荷重評価の手順

抗力 F_D は一般的に(1)式で示される。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 A_D \quad (1)$$

F_D : 抗力(kN)

ρ : 流体の単位体積質量(t/m^3)

C_D : 抗力係数

u : 流速(m/s)

A_D : 津波進行方向から見た受圧部分の見付面積(m^2)

抗力係数は、本調査の対象構造物がほぼ四角形であることから、文献1)を参考に $C_D = 2.0$ と仮定すると、(1)式より(2)式を得る。

$$F_D = \rho u^2 A_D \quad (2)$$

一方、図1に示すような等圧分布波圧を仮定し、前報(その1)で求めた破壊形式に応じた構造物の耐力に相当する波圧を ω_R とすると、その時の水平力 V は(3)式で表すことができる。ここで、波圧の作用高さは津波が構造物を越流しない場合には計測浸水深 η_m とし、越流する場合は構造物の高さ H とする(図1)。また、開口に波圧は作用しないものとした。

$$V = \omega_R A_D \quad (3)$$

よって、 $F_D = V$ とすると、構造物の耐力相当時の流速 u_R は、(4)式で表される。

$$u_R = \sqrt{\omega_R / \rho} \quad (4)$$

また、流勢の指標となるフルード数 F_r は、流速 u と浸水深 η_m で関係づけられる。よって、構造物の耐力相当時のフルード数 F_{rR} は、(5)式のように構造物の耐力相当時の波圧 ω_R と計測浸水深 η_m を用いて表される。

$$F_{rR} = \frac{u_R}{\sqrt{g\eta_m}} = \frac{\sqrt{\omega_R / \rho}}{\sqrt{g\eta_m}} \quad (5)$$

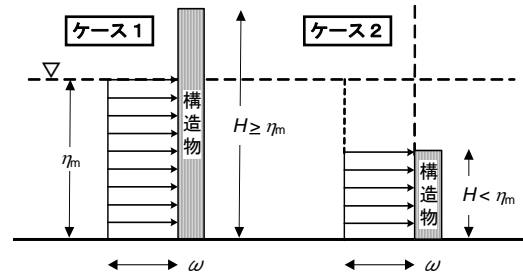


図1 抗力による検討で想定した計測浸水深 η_m 、構造物高さ H と波圧分布 ω の関係

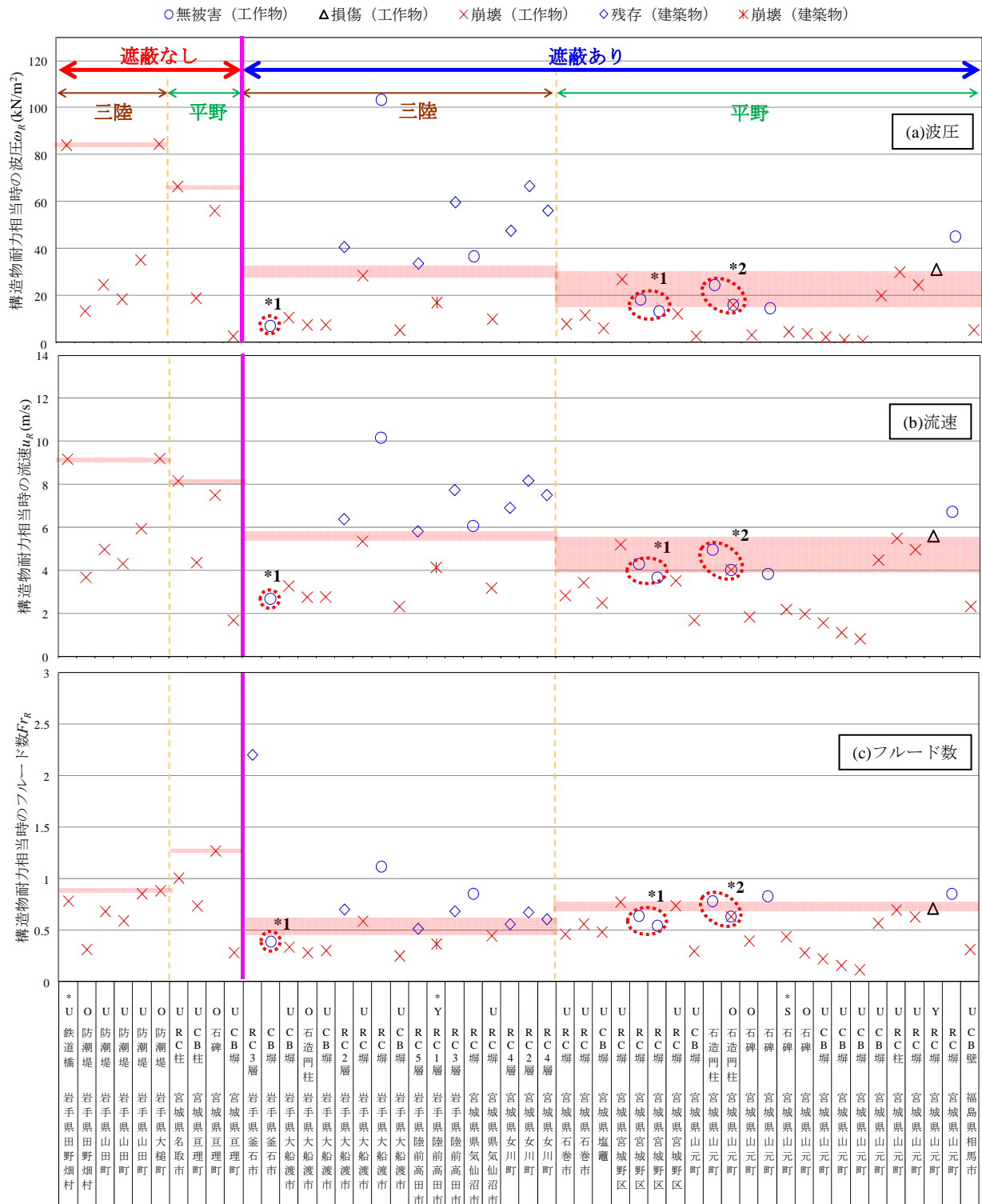
以上より、構造物の耐力相当時の波圧 ω_R を用いて(4)式、(5)式から構造物の耐力相当時の流速 u_R とフルード数 F_{rR} を算出し、構造物被害の有無の境界値を探ることで津波荷重を推定する。

3. 構造物の被害程度と抗力式に基づく津波荷重評価

2章に基づき算出した構造物の耐力相当時の波圧 ω_R 、流速 u_R 、フルード数 F_{rR} を図2に示す。図中の*1で示した構造物群は津波進行方向と平行な工作物で、波力の影響を受けにくく、耐力相当時の波圧や流速が低いにもかかわらず無被害である事例のため、本章の境界値に関する詳細な検討からは除外した。なお図2では、前報(その1)で示したとおり遮蔽物の有無が議論の重要な要因となると考え、まず遮蔽物の有無で構造物群を二分し、これらを左から順に北から並べて示した。また図中のアルファベット記号は各構造物の破壊モードを示し、それぞれ Y: 鉄筋降伏、U: 鉄筋破断、S: 滑動、O: 転倒を表す。

まず構造物に作用した波圧は、図2(a)より遮蔽物のない場合には $85kN/m^2$ 程度以上、遮蔽物のある場合は $15 \sim 30kN/m^2$ 程度であったと推定される。ただし、滑動耐力および層せん断力で耐力を算定した事例(図2の*U、*Y、*S印の3例)を除く崩壊した工作物については、波圧分布形状の違い(三角形分布と等分布)から前報(その1)による検討と比べ波力は小さく評価される。

流速は、局所的な流れや遮蔽物の種類による波力低減効果の程度により、連続的に変化すると考えられるが、本検討に用いた構造物を対象としたデータにおいては、図2(b)より遮蔽物のない場合では $9m/s$ 程度以上、遮蔽物のある場合では $4 \sim 6m/s$ であったと推定される。算出された流速と実際の流速を比較するため、津波来襲時に撮影された記録映像を利用して、あらかじめ現地でも実測した距離を漂流物

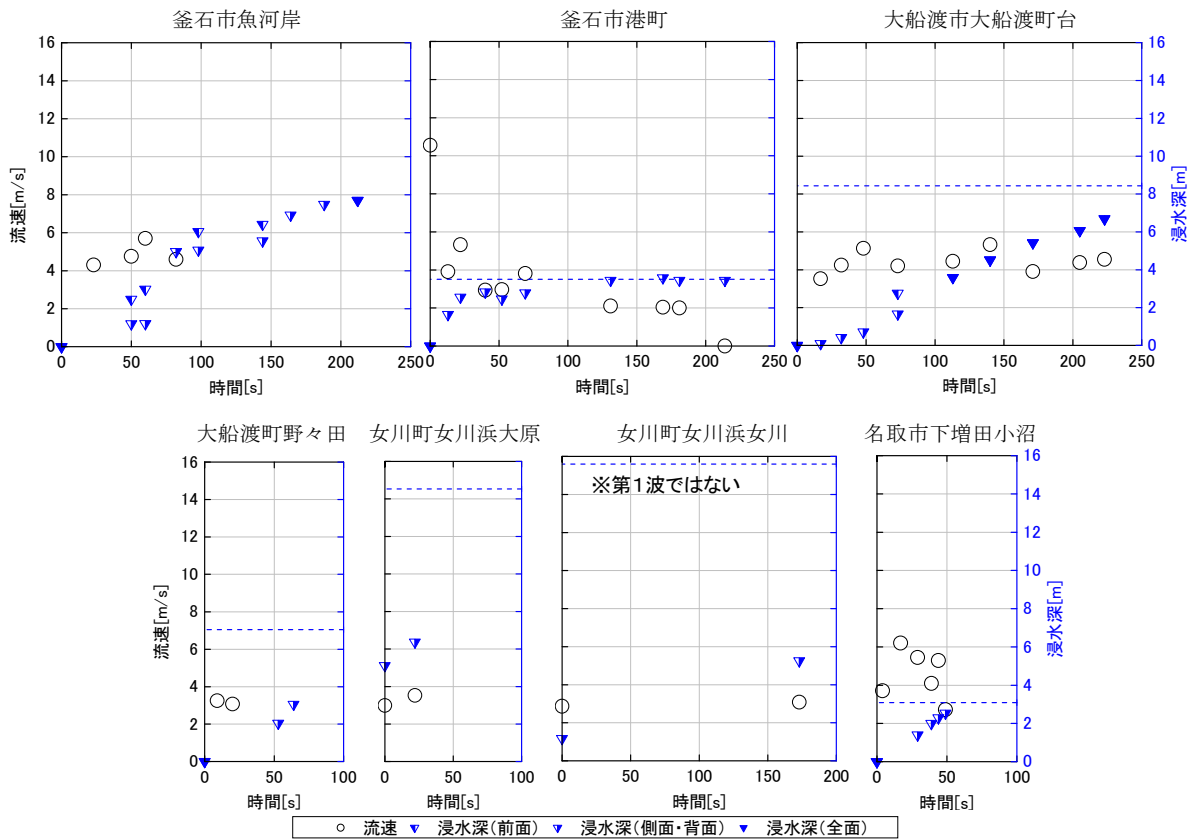


*1 津波進行方向と平行な工作物で、波力の影響を受けにくく、耐力相当時の波圧や流速が低いにもかかわらず無被害である事例
 *2 根入れ深さの異なる同形式の門柱で、根入れ部の転倒抵抗を無視した
 ■■■■■ は被害/無被害の境界と考えられる範囲（遮蔽物あるの地域）および下限（遮蔽物なしの地域）をそれぞれ表す。
 記号はそれぞれ被害形態を表す（Y：鉄筋降伏，U：鉄筋破断，S：滑動，O：転倒，無印：被害なし）。

図2 構造物耐力相当時の波圧，流速，フルード数と被害程度の関係

が通過するのに要する時間を計測し、流速を算定した。算定は三陸地方の釜石市（2か所）、大船渡市（2か所）、女川町（2か所）、仙台平野の名取市（1か所）、の計7か所において行い、いずれも防潮堤、防潮堤など津波の波力低減効果を期待し得る構造物を有する地域である。また、女川町

（女川浜女川）における映像では来襲している津波の浸水域以外の地域に既に大きな被害が見られ、撮影された波は第二波以降であると考えられる。それ以外の6か所における映像には津波来襲時初期の状況が収められており、第一波であることが確認されている。図3に流速を映像により

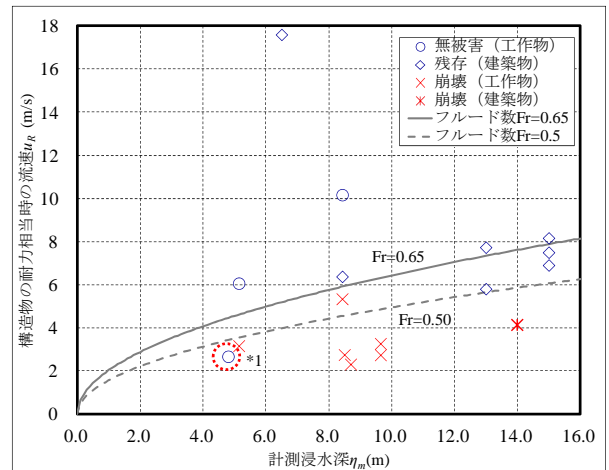


※流速，浸水深の算定を開始した時刻を0秒とし，実測が可能であった時間までをグラフにした。
 なお，図中の破線は各地域の計測浸水深 η_m を表す。

図3 記録映像から算定された流速と浸水深

算定した結果を示す。なお図3では，流速・浸水深が算定可能な記録時間帯のみを取り出し，その算定開始時刻を時間0秒としてグラフ化している。プロットがない時間は，漂流物がないなど流速算定が不可能であった時間帯である。算定された流速は時間・場所共に限定的であること，撮影角度や映像の画質の関係上，精度の高い算定が困難であったことなどを考慮する必要はあるが，参考値として参照すると，流速は最大浸水深にかかわらずいずれも概ね3~6m/s程度であり，抗力式により算出された値(4~6m/s)と整合した。

フルード数は，図2(c)より遮蔽物のない地域では1.27以上，遮蔽物のある地域のうち三陸地方では0.5~0.65程度，同平野部では0.8程度であり，遮蔽物のある地域では三陸地方の方が平野部よりもやや低い値となった。図2(b)で遮蔽物のある地域では三陸地方の流速は平野部と比べ同程度もしくはやや高めの数値であるにもかかわらずフルード数が逆転することを考えると，三陸地方は浸水深が高い割に流速は高くなかったことがわかる。この傾向をより詳細に検討するために，三陸地方で遮蔽物のある地域の構造物を対象に，構造物の耐力相当時の流速 u_R ，フルード数 F_{rR} ，および計測浸水深 η_m の関係を図4に示す。同図によると，計測浸水深 η_m が概ね13mを超える地域では，被害の有無を区分するフルード数は他地域より低く，浸水深の割に流速が低いとした前述の傾向がより強いことがわかる。以上から，



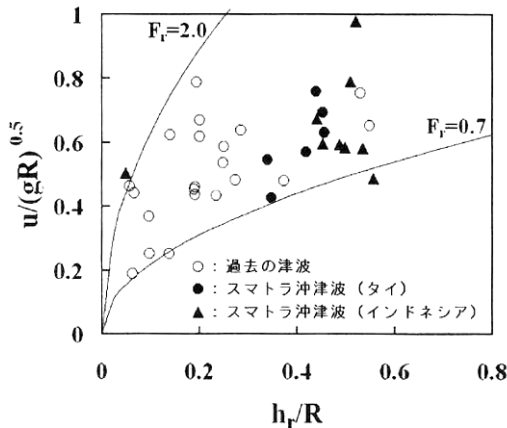
*1 津波進行方向と平行な工作物で波圧の影響を受けにくく，耐力相当時の波圧が低いにもかかわらず無被害である事例
 ※建築物についての η_m は建築研究所の調査結果²⁾を用いた

図4 計測浸水深，流速とフルード数の関係
 (三陸地方の遮蔽物による波力低減効果が期待できる場合)

遮蔽物のある地域のうち三陸地方については，構造物の被害の有無の境界となるフルード数は0.65程度であるが，計測浸水深 η_m が概ね13mを超える地域ではこれを下回る事例も見られた。

松富らによるスマトラ島沖地震津波の調査からフルード数をまとめた図5³⁾では，フルード数は0.7~2.0の範囲に分布するとしている。一方，図2に示す本稿の検討結果は図5

の比較的低い範囲に分布し、特に三陸地方の計測浸水深 η_m が概ね 13m を超える地域では、一部 0.7 を下回った。これは、松富らの調査³⁾と異なり本調査の対象地域には多少はあるにせよ海岸に人工物が設置されていることに加え、リアス式海岸となる三陸地方の地形の影響などが理由として考えられる。



著者注 hr : 建物背面の浸水深, R : 近傍の津波高, u : 氾濫流速
図5 浸水深と氾濫流速の関係³⁾
 (背面水深を浸水深とした場合)

4. 抗力に基づく水深係数 a の検討

以上、抗力に基づく検討により、前報(その1)では検討できなかった流速とフルード数 F_r の推定が可能となり、本津波の特性を知ることができた。また、前章で示したとおり、抗力式に基づき算出された流速は、記録映像から算定される流速と概ね対応しており、それに基づいて算出されるフルード数も実情を反映していると考えられるため、本章ではフルード数を用いて水深係数 a を評価し、これを(その1)で求めた水深係数 a と比較する。

$a\eta_m$ が構造物の高さを超えず、無開口の構造物の場合には、「静水圧分布による波力」は構造物の幅 1m あたり(6)式のように、「抗力式による波力」は $C_D=2.0$ とすると幅 1m あたり(7)式のようにそれぞれ算出される。

$$F_x = \frac{1}{2}(a\eta_m \times 1)\rho g \eta_m = \frac{a^2}{2} \eta_m^2 \rho g \quad (6)$$

$$F_D = \rho u^2 A_D = \rho u^2 (\eta_m \times 1) = F_r^2 \eta_m^2 \rho g \quad (7)$$

$F_x = F_D$ とすると(8)式が得られ、水深係数 a とフルード数 F_r の関係は(9)式のように求まる。

$$\frac{a^2}{2} = F_r^2 \quad (8)$$

$$a = \sqrt{2} \times F_r \quad (9)$$

よって、3章で求めたフルード数を(9)式により水深係数 a に換算すると、表1のように算出される。

前報(その1)で算出された水深係数 a の結果と比較すると、遮蔽物あり、なしそれぞれにおいて、(その1)の水深係数 a の値は表1の値の平均的な数値となっており、また遮蔽物があり計測浸水深 η_m が概ね 13m を超える地域では、水深係数 a は 1 を下回る共通の傾向が見られた。以上のように、異なる手法で算出された水深係数 a の値は、概ね整合した結果であった。

表1 抗力に基づき算定した被害・無被害の境界となるフルード数 F_r 、水深係数 a の値

| | 遮蔽物あり | 遮蔽物なし |
|------|--|---|
| 三陸地方 | $F_r=0.65^*$ $\Rightarrow a=0.92^*$ | $F_r=0.9$ 以上 $\Rightarrow a=1.27$ 以上 |
| 平野部 | $F_r=0.8$ $\Rightarrow a=1.13$ | $F_r=1.27$ 以上 $\Rightarrow a=1.8$ 以上 |

* ただし浸水深が 13m 以上の地域では上記を下回る

5. まとめ

津波荷重算定に関わる水深係数 a について、本報(その2)では抗力式に基づき、流速やフルード数の算定結果等を用いて検討した。本検討により表1にまとめた数値が得られ、その結果は静水圧式に基づく前報(その1)の検討結果と平均的に整合した。

なお、前報(その1)および本報(その2)の検討は特定の津波災害、地域における検討であり、また遮蔽物のない地域では無被害の構造物のデータがないなど限られたデータに基づくものであるため、設計用の津波荷重を評価するにはさらに設計用浸水深の評価の精度、津波避難ビルの施設としての重要性、実験結果との整合性なども併せて考慮する必要がある。また、浮力や衝突などに対する検討も重要な課題である。

参考文献

- 1) 土木学会：水理公式集，1971
- 2) 東京大学生産技術研究所：平成23年度 建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」報告書，平成24年3月
- 3) 松富英夫，榊山勉，S.Nugroho，都司嘉宣，谷岡勇市郎，西村裕一，鎌滝孝信，村上嘉謙，松山昌史，栗塚一範：Banda Ache と周辺における 2004 年インド洋津波と被害想定からみた課題，海洋工学論文集 第 52 巻(2005)，pp. 1366 - 1370
- 4) 朝倉良介，岩瀬浩二，池谷毅，高尾誠，金戸俊道，藤井直樹，大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集 第 47 巻(2000)，pp. 911 - 915
- 5) 中埜良昭：スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に基づく津波避難施設の設計外力評価，日本建築学会技術報告集，第 13 巻 第 25 号，pp.337-340，2007.6

*1 東京大学大学院 大学院生・修士(工学)
 *2 鹿島建設 建築設計本部・修士(工学)
 *3 東京大学生産技術研究所 教授・工博
 *4 (独) 建築研究所 構造研究グループ長・工博
 *5 (財) 日本建築防災協会 審議役・工修
 *6 (財) 日本建築センター 審議役・工博
 *7 (財) 日本建築防災協会 理事長・工博

Graduate Student, The University of Tokyo, M. Eng.
 Architectural Design Division, Kajima Corporation, M. Eng.
 Professor, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Dr. Eng.
 Director, Department of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.
 Senior Technical Adviser, The Japan Building Disaster Prevention Association, M. Eng.
 Senior Technical Adviser, The Building Center of Japan, Dr. Eng.
 President, The Japan Building Disaster Prevention Association, Dr. Eng.