

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560486

研究課題名（和文） スロッシングによる内容液の溢流量の算定とその減衰対策への研究

研究課題名（英文） Research on Sloshing Measures of Estimation of Overflowed Liquid and Control Method with Damping Device

研究代表者

平野 廣和（HIRANO HIROKAZU）

中央大学・総合政策学部・教授

研究者番号：80256023

研究成果の概要（和文）：東日本大震災においてもやや長周期の地震動により、水道等の矩形貯水槽においてスロッシング現象が発生し、内容液が揺動して溢流、さらには貯水槽自体を壊したことが調査の結果多数確認された。本研究では、実機矩形貯水槽を小型および大型振動台で加振実験を行うことにより、貯水槽の壊れるメカニズムを解明し、ある加振方向を有する時の矩形水槽の長辺方向と短辺方向の2つの固有振動数が干渉し、液面揺動が急激に変化することにあることを掴んだ。さらに、内部に簡易な樹脂製の格子状の制振装置を設置することにより、スロッシングの減衰定数の大幅な増加を計り、スロッシングによる貯水槽の被害を防止することを可能とした。

研究成果の概要（英文）：The sloshing phenomenon caused by long-period earthquake ground motion has observed repeatedly in recent years. Overflow of liquid in water tanks often take place. Damage of water tanks by the East Japan Earthquake is the most recent case. In contrast with circular shake, rectangular tanks show direction-oriented response behavior. In this research, shaking experimentation was conducted to make this behavior effect clear by changing vibrating angle. Experiment results are suggesting interaction of vibration modes.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：スロッシング，矩形型水槽，加振実験，やや長周期地震動，制振，自由表面解析，減衰

1. 研究開始当初の背景

2007年7月に発生した新潟県中越沖地震(M6.8)で、東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プール水が、オペレ

ーティングフロア（管理区域）の全域にわたり溢れ出した。この状況が3号機に設置されているビデオカメラの映像記録より確認され、地震発生時に使用済み核燃料貯蔵プール

水が大きく波打ち、水面と床の高さが 30cm あったが、この高さを越える勢いで放射線管理区域外へ溢流した。

これを受けて本研究では、東京電力㈱柏崎刈羽原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プールの縮尺約 1/20 に相当する矩形断面容器を用いて、スロッシングの基礎的な研究を行ってきた。この成果の一つでスロッシング対策案として、金網を容器内水槽中心部に設置することで、起振中の波高を抑制することができ、かつ減衰も増大することを確認した。減衰効果のメカニズムは、金網を設置することにより金網を通過する時の液体の抵抗力を増加させ、見かけ上流体の粘性が付加されることを期待するものである。これにより、波高の低減、減衰定数の増加につながり、溢流を防ぐことを小型矩形断面容器では確認をしている。1 次、2 次の固有振動数域において、約 3 倍程度の減衰が付加できることを掴んでいる。また、溢流で大きく寄与する水槽端部での応答波高も約 40% 程度の低減をはかることができています。

本研究の実施途中に、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災(M9.0)が発生した。東北電力女川原子力発電所内の使用済み核燃料貯蔵プールにおいて同様なスロッシングによる溢流事故が発生した。また被災地域内の上水道配水施設等での大型矩形鋼製タンクの破損、各地での FRP 製、ステンレス製の矩形貯水槽の破損被害が多数報告されるに至った。

(震源から 300Km 以上離れたつくば市では高エネルギー研究機構の貯水槽が破壊した。) この原因は、容器内の液体が外部からの比較的長い周期の振動によって揺動することである。このスロッシングに対して何の対策も施していないと、液体の波がタンク周壁や天井に繰り返し衝突し、貯蔵タンクが損傷することになる。なお、ここでの被害は、特に正方形断面容器を組み合わせた形状の貯水槽に被害が集中していることが判った。

以上の様な被害が実際に発生しており、各種大型矩形断面容器におけるスロッシング現象の把握、さらにはスロッシング対策(制振装置の付加)の必要性が挙げられる。このような背景から、近い将来必ず発生する東海、東南海、南海地震、首都圏直下型地震等に備えて矩形貯槽の動的な挙動を把握し、このスロッシング現象を制振することは、地震災害発生時のライフライン確保に必要なことであり、社会的に大きなニーズがあると考えられる。

2. 研究の目的

スロッシングが発生した場合に被害を起す引き金となるのが、水槽などの液体貯槽物からの液面揺動と溢流である。この液面揺動と溢流の機構を解明し、かつこれを抑える

(制振装置を付加する)ことは、防災上重要なポイントである。さらに、既存の貯槽水槽が多数存在している事実から、この既存の貯槽水槽に後付できる制振装置を開発することが重要である。これら二つの項目を本研究の目的とし、併せて実機構造物への本研究成果の適用を行う。

本研究で扱う矩形断面容器は、長辺方向と短辺方向にそれぞれ異なるスロッシング固有振動数が存在している。このため、矩形断面容器の加振方向角を変えて加振させた場合、この異なるスロッシング振動が相互干渉を引き起こし、スロッシング挙動に影響を与えることが判っている。一方、既存の水道施設等の水槽は、メンテナンスを考慮して正方形断面容器を複数組み合わせられた形となっている。正方形断面の特徴は、矩形断面容器とは異なり断面の辺長比が等しいことから、各辺のスロッシング固有振動数の値が等しくなるので、特に加振方向角によって液面揺動が大きくなる。この挙動を制振するために、できる限り汎用の製品を組み合わせる単純な構造により、安価でかつ効率よい手法(制振装置)の開発が希求されている。

一方、本研究で対象とするのは、主として水道用のタンク(貯水槽)であることから、制振装置の機能の他に以下の条件を満足することが求められる。

- ① 耐塩素性を考慮すること
- ② 1 年一回の開放点検時に清掃が容易であること
- ③ 既存のタンク(直径φ800 程度のマンホールのみがあり)へ搬入可能な物これらを満足するものとして、矩形水槽内に十字構造の網を配置することを提案する。

前述の 3 つの条件を満足させるために樹脂製に変更し、四方枠体と複数の線状体とから成るといふ単純な構成の制振装置とする。これにより、貯蔵タンクの内部構造に合わせて自由に制振装置の形状やサイズを変更できるように考案している。したがって、既存の水槽に装着する場合でも、現場での加工・施工性が容易であり、かつ汎用性の高い制振装置を提供する。

ここで、本スロッシング制振方法の特徴は、液体の流通を許容する部分と液体の流通を阻止する部分とを二つのパネル状の制振装置が互いに交差する状態で配置したことである。さらに、液面から所定深さまでの範囲に配置することで最適な制振効果を与えることができるのが特徴であり、これが新たな技術である。

さらに、実験での研究成果ならびに従来から培ってきた数値流体解析技術等を使って、実機に装着可能な制振装置の設計、製作を行う。

3. 研究の方法

やや長周期の地震動により貯槽内にスロッシング現象が生じ、側壁を越える溢流現象が生じる。この現象を消防法の基準に基づき、速度応答スペクトルにより把握を行う。具体的には小型振動台でまず現象の把握を行い、その結果に基づいて大型振動台（愛知工業大学所有）で振動実験を行い、溢流現象のメカニズムの解明を行った。同時に有限要素法による数値流体力学を用いて、実験結果の力学的裏付けを行った。

次にスロッシングを減衰させて波高を抑える制振装置を申請者らのこれまでの研究実績に基づいて提案する。矩形断面水槽には複数枚の金網を水槽内に設置して減衰を得ることとする。この検討には、まず小型振動台での実験の後、成果が得られたならば、実機貯水槽を大型振動台に設置して実物での確認実験を行った。併せて数値流体解析により確認を行い、実機装着への設計法の提案を行った。

4. 研究成果

(1) 正方形断面の検討

① 1次モードの検討(1.1Hz 起振)

1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を図-1に示す。図-1より、1次モードでは加振方向角を変化させていくと徐々に最大波高が増大し、加振方向角45°の場合に最大波高が10.1cmとなり、加振方向角が0°の場合に比べて最大波高が約60%程増加している。加振方向角45°を超えると最大波高が徐々に減少していき、加振方向角90°の場合には最大波高が6.8cmとなり加振方向角が0°もしくは5°の場合の最大波高と同等の値となっている。矩形断面とは明らかに異なった挙動を示している。

図-2に加振方向角が0°と45°の場合の起振から50秒間の応答波形を示す。加振方向角が45°の場合には、最大波高を観測した後に約10秒間にわたって応答波高がほとんど減衰せず、一定の波高を示している。この様に加振方向角が変化することで、スロッシング挙動に影響を与えることがわかる。

一方、減衰定数に関しては図-1に示す様に加振方向角に関わらず0.0025~0.0035と比較的に小さい一定の値となる。

② 2次モードの検討(2.3Hz 起振)

図-3に2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数の関係を示す。2次モードでは加振方向角が30°~75°の場合に最大波高の値が40%程度増加している。加振方向角が65°の場合に最大波高が8.8cmと最も大きい値となっている。

図-4に加振方向角0°と65°場合の起振から50秒間の応答波形を示す。図-4より、加振方向角が0°と65°の場合を比較すると加振方向

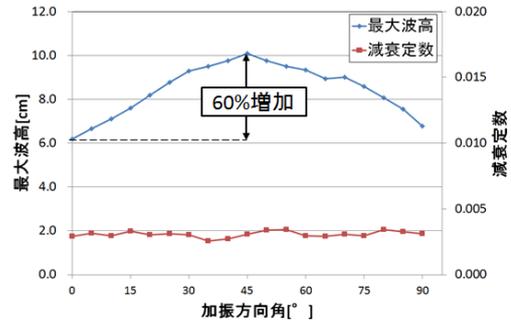
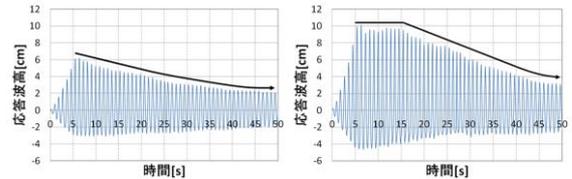


図-1 1次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a)加振方向角0° (b)加振方向角45°

図-2 1次モードの起振から50秒間の応答波形

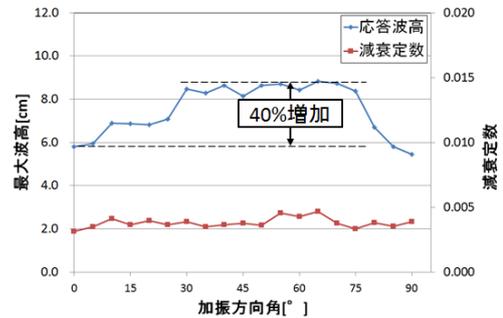
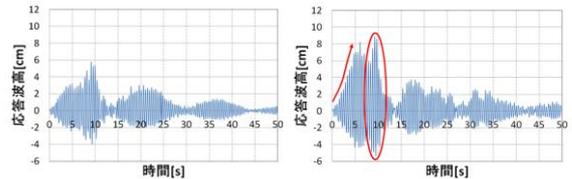


図-3 2次モードの各加振方向角における最大波高と減衰定数



(a)加振方向角0° (b)加振方向角65°

図-4 2次モードの起振から50秒間の応答波形

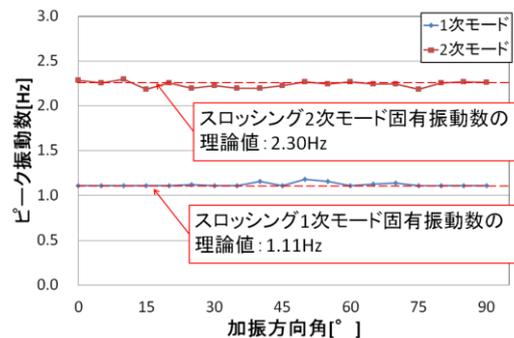


図-5 各加振方向角におけるピーク振動数

が65°の場合の方が起振中に応答波高が大きくなっている。また、起振開始から約5秒後と約10秒後の2回にわたって応答波高が卓越していることがわかる。さらに、加振方向角が変化したことにより回転する挙動が促されることも応答波高が増大した原因の一つと考えられる。

減衰定数に関しては、加振方向角に関わらず図-3に示すように0.0030~0.0050とほぼ一定の値をとることがわかる。

③正方形断面容器の特徴

1,2次モードそれぞれのモード形状において、加振方向角が変化することにより応答波高が増大することが見られた。そこで1,2次モードの応答波形に着目したところ加振方向角が変化したことにより応答波形に影響を与えることを確認した。また、2次モードでは加振方向角により液面形状が変化することがわかった。

また、図-5に1次モード、2次モードの場合の各加振方向角におけるピーク振動数を示す。ここで理論値より求めた加振方向角 0° におけるスロッシング固有振動数であり、この値は容器の幅と水深に依存している。ところが、図-5に示すように、加振方向角が変化することで起振軸上の容器の幅は変化するが、スロッシング固有振動数は起振軸上の容器の幅に依存せず、ほぼ一定の値を取ることが確認できる。

(2) 実機正方形貯水槽での制振実験

①実験条件

各種容器におけるスロッシング対策は、これまで様々な検討が行われており、この中で自由表面を有する矩形断面では抵抗板を利用する方法が代表的な方法である。この方法は、流れ場を直接コントロールする方法であり、機械的な要素が無く単純かつ安定した制振効果が期待できる。例えば自由表面付近に側壁から水平に抵抗板を設置したもの、鉛直方向に抵抗板を配置してここで生じる渦により減衰効果を得るものなどがある。しかし、これらは新設の貯水槽には設置し易いが、既存の貯水槽に設置する場合は法的に義務付けられている内部の定期清掃の方法など十分検討しなくてはならない。

これに対し本研究で提案する方法は、網目状の板やパネルを制振装置とし、水槽内を横断する様に垂直に設置する方法である。これは、やや長周期の固有振動数を有する構造物の制振装置として開発されたスロッシングダンパーの考え方を応用したものである。この方法により期待できる効果は、スロッシングにより液体揺動が生じた場合、液体が網目を通過するときに抵抗力が生じ、水の粘性が見掛け上大きくなることである。これにより減衰が付加され、流速を抑えて波高を低減することができる。

本研究では、写真-1に示す実物の貯水槽を大型振動台に設置し、これに写真-2に示す伸縮性と耐塩素性を有する樹脂チューブをL字アングルで組んだ1000mm四方のフレームに網目状に取り付けて制振装置装着する。このフレームを図-6のように水槽上部1/3の場所に十字型に6つ設置する。また、チューブ同



写真-1 実験状況



写真-2 設置した制振装置

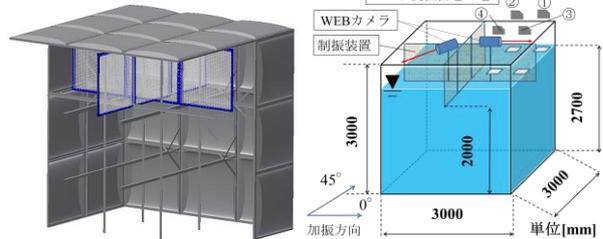


図-6 制振装置設置状況

図-7 機器設置図

士の間隔は20mmピッチで格子状に取り付けた場合を制振1、40mmピッチで取り付けた場合を制振2とする。各々の網目の開口率は、制振1は15.4%、制振2は46.8%である。

図-7は計測機器の配置図である。

②実験結果

(a) 1次モードの検討

1次モードの各加振方向角における隅角部の最大波高を図-8に示す。隅角部の最大波高は加振方向角が 45° に近づくにつれて増大する。これは、加振方向角の増大に伴い隅角部に波が集中するためである。制振装置設置後は、非制振と比較して加振方向角の有無に依存せず、制振1では60%程度、制振2では30%程度の低減率で波高が抑制されている。

1次モードの各加振方向角における減衰定数を図-9に示す。減衰定数は加振方向角に関わらずほぼ一定の値となる。非制振時のおおむね0.005であるが、制振1では0.010~0.012と非制振時の約2倍、制振2では0.007~0.008と非制振時の約1.6倍に増加させることができる。

(b) 2次モードの検討

2次モードの各加振方向角における隅角部の最大波高を図-10に示す。隅角部の最大波高は、加振方向角の違いによる影響はわずかであった。対策後は、いずれの加振方向角に対しても効果があり、制振1では非制振時の60~80%、制振2では40~60%程度の低減率で波高が抑制されている。

2次モードの各加振方向角における減衰定数を図-11に示す。減衰定数は加振方向角に関わらずほとんど一定の値となる。非制振時では減衰定数が0.001~0.002程度である。制振1では0.007~0.008、制振2では0.005~0.006程度に減衰定数を増加させることができる。

本研究で貯水槽実機を使用した実験を行

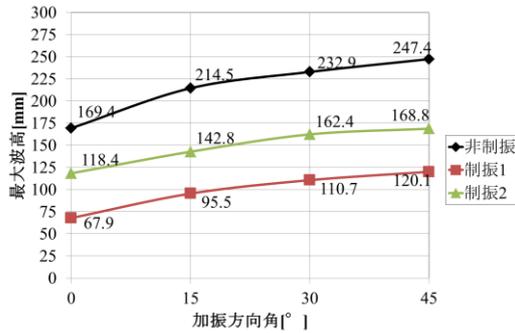


図-8 1次モードにおける最大波高

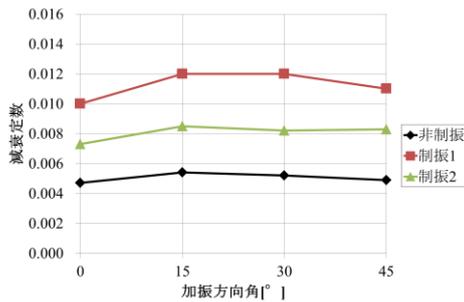


図-9 1次モードにおける減衰定数

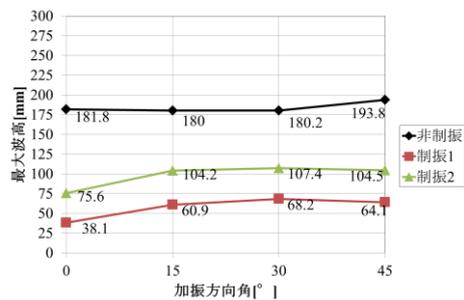


図-10 2次モードにおける最大波高

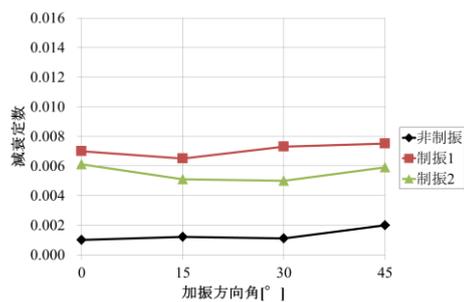


図-11 2次モードにおける減衰定数

い、制振装置を実機タンクに十字型でかつ天井部から1/3の所までに配置してスロッシング制振対策の検討を行った。この結果、どの実験状態においても非制振時と比較して最大波高の低減ならびに減衰定数の増加を得ることができた。さらにスロッシングの制振装置を設置することでどの加振方向に

においても1次、2次モードともに最大波高を低減させることができることを定量的に確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計6件)

① 池田達哉, 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 矩形断面容器におけるスロッシング1次・2次モードの対策案に関する検討, 土木学会応用力学論文集、査読有, No.13, 2010, pp.659-666

② 小松領平, 井田剛史, 平野廣和, 連重俊: 浮き屋根式タンクのスロッシング減衰装置の施工性に関する検討, 土木学会構造工学論文集編集, 査読有, No.57A, 2011, pp.53-62

③ 井田剛史, 小松領平, 平野廣和, 森川卓保: 浮屋根式実機タンクを用いてのスロッシング制振装置の性能評価, 土木学会応用力学論文集, 査読有, No.14, 2011, pp.935-944

④ 則竹一輝, 鈴木森晶, 奥村哲夫, 佐口浩一郎: 矩形貯槽におけるスロッシング挙動とその抑制方法に対する検討, 土木学会論文集A2分冊(応用力学)特集号, 査読有, No.14, 2012, pp.785-794

⑤ 遠田豊: 井田剛史, 平野廣和, 佐藤尚次: 矩形断面容器において加振方向角を変化させた場合のスロッシング現象, 土木学会論文集A2分冊(応用力学)特集号, 査読有, No.14, 2012, pp.637-744

⑥ 則竹一輝, 鈴木森晶, 奥村哲夫: 矩形貯槽のスロッシング現象とプラスチックフィルターを用いた抑制方法, 愛知工業大学研究報告, 査読無, 47号 2012, pp.291-300

〔学会発表〕(計9件)

① 井田剛史, 平野廣和, 連重俊, 小松領平: 浮き屋根式タンクのスロッシング減衰装置の施工性に関する検討について, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月2日, 北海道大学

② 池田達哉, 平野廣和, 井田剛史, 佐藤尚次: スロッシング複数モードの対策案に関する一考察, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月2日, 北海道大学

③ 鈴木森晶, 奥村哲夫: 加振方向角を変えた矩形型貯槽のスロッシング現象に関する基礎的実験, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010年9月2日, 北海道大学

④ 遠田豊, 平野廣和, 佐藤尚次, 井田剛史: 加振方向角を変化させた矩形断面容器のスロッシング挙動, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 愛媛大学

⑤ 則竹一輝, 鈴木森晶, 田中直貴, 青木徹彦: 加振角度を変えた矩形型貯槽の寸法比と水深比による液面揺動に関する研究, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 愛媛大学

⑥ 遠田豊, 平野廣和, 井田剛史, 佐藤尚次 : 正方形断面容器において加振方向角を変化させた時のスロッシング挙動, 第 39 回土木学会関東支部技術研究発表会, 2012 年 3 月 13 日, 関東学院大学

⑦ 遠田豊, 平野廣和, 井田剛史, 佐藤尚次 : 加振方向角を変化させた正方形断面容器のスロッシング挙動, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月 7 日, 名古屋大学

⑧ 井田剛史, 平野廣和, 勝井達也, 連重俊 : 受水槽のスロッシング被害を想定した制振装置検討のための基礎的実験, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月 7 日, 名古屋大学

⑨ 曾根龍太, 平野廣和, 井田剛史, 佐藤尚次 : 正方形断面容器のスロッシング制振対策に関する一考, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012 年 9 月 7 日, 名古屋大学

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称 : スロッシング制振方法及び制振装置

発明者 : 平野廣和, 井田剛史, 連重俊

権利者 : (学)中央大学, (株)十川ゴム

種類 : 特許

番号 : 特願 2012-174163

出願年月日 : 2012 年 8 月 6 日

国内外の別 : 国内

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fps.chuo-u.ac.jp/~hrsk/>

<http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0920120831aab.html>

<https://www.nhk.or.jp/shutoken/net/report/20121113.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平野 廣和 (HIRANO HIROKAZU)

中央大学・総合政策学部・教授

研究者番号 : 80256023

(2) 研究分担者

鈴木 森晶 (SUZUKI MORIAKI)

愛知工業大学・工学部・教授

研究者番号 : 90273276

(3) 連携研究者

丸岡 晃 (MARUOKA AKIRA)

八戸工業高等専門学校・建設環境工学科・准教授

研究者番号 : 30310973

(4) 研究協力者

井田 剛史 (IDA TSUYOSI)

(株)十川ゴム・研究開発部・課長
連 重俊 (SHIGETOSHI MURAJI)
(株)ムラジ・代表取締役