

平成16年度建設技術研究開発助成制度  
事後評価報告書

平成17年3月

国土交通省大臣官房技術調査課

---

目次

I. 研究評価結果

1. 総論
2. 各論
3. 参考

II. 参考資料

## I. 研究評価結果

### 1. 総論

#### (1) はじめに

建設技術研究開発助成制度は、建設分野の技術革新を推進するため、国土交通省の所掌する建設技術の高度化及び国際競争力の強化、国土交通省の実施する研究開発の一層の推進等に資する研究開発を提案公募の形式により研究開発活動に携わる者から広く募り、優秀な提案について研究開発費を助成するものである。

実施課題の事後評価は、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成13年11月28日内閣総理大臣決定）及び「国土交通省研究開発評価指針」（平成14年6月国土交通省策定）を踏まえ、以下の事後評価対象課題（平成15年度終了課題）を対象に、建設技術研究開発助成制度評価委員会において、専門的な視点から詳細かつ厳正に実施した。

#### 事後評価対象課題

##### 【一般分野】

	研究開発年度	課題名	研究代表者（所属）
1	平成15年度	財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発	笠井 和彦 （東京工業大学応用セラミックス研究所材料融合システム部門教授）
2	平成15年度	圧電高分子膜による軽量遮音パネルの研究開発	山本 貢平 （財団法人小林理学研究所所長）

##### 【総合技術開発プロジェクト関連分野】

	研究開発年度	課題名	研究代表者（所属）
3	平成15年度	鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発	廣瀬 壮一 （東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻教授）

#### (2) 平成16年度評価検討の実施経緯

建設技術研究開発助成制度評価委員会を平成17年2月22日に開催し、ヒアリング（研究代表者による研究開発成果の説明及び評価委員との質疑応答）を実施し、評価結果の検討を行った。

(3) 評価結果一覧

	課題名	研究代表者（所属）	総合評価	Ⅰ 目標達成度	Ⅱ 研究開発計画	Ⅲ 研究成果	
						社会性	技術革新性
1	財産保持性に優れた戸 建制振住宅に関する研 究開発	笠井 和彦 （東京工業大学応用セラ ミックス研究所材料融合 システム部門教授）	a	a	a	a	a
2	圧電高分子膜による軽 量遮音パネルの研究開 発	山本 貢平 （財団法人小林理学研究 所所長）	b	c	b	b	b
3	鋼構造物の損傷度診断 のための高精度超音波 技術の開発	廣瀬 壮一 （東京工業大学大学院情 報理工学研究科情報環境 学専攻教授）	b	b	b	b	a

(参考) 事後評価項目及び評価基準

<p><u>総合評価</u></p> <p>評価の観点：</p> <p>・以下の項目を総合的に評価</p>	<p>a：非常に優れた研究であった。</p> <p>b：優れた研究であった。</p> <p>c：優れた研究ではなかった。</p>
<p><u>I. 目標達成度</u></p> <p>評価の観点：</p> <p>・当初の目標を達成することができたか。</p>	<p>a：十分達成した。</p> <p>b：概ね達成した。</p> <p>c：達成しなかった。</p>
<p><u>II. 研究開発計画</u></p> <p>評価の観点：</p> <p>・研究開発計画、経費、研究開発体制等の計画が適切であったか。</p>	<p>a：適切であった。</p> <p>b：おおむね適切であった。</p> <p>c：不適切であった。</p>
<p><u>III. 研究成果</u></p>	
<p><u>(1) 社会性</u></p> <p>評価の観点：</p> <p>・研究開発の成果が実用化されることにより、単に社会資本整備の分野にとどまらず、国民生活、経済活動への波及効果が期待できるか。</p>	<p>a：十分期待できる。</p> <p>b：概ね期待できる。</p> <p>c：期待できない。</p>
<p><u>(2) 技術革新性</u></p> <p>評価の観点：</p> <p>・学術的研究及び特許等に係る技術の応用・改良等をもって、既存の建設分野の技術に比べて相当程度の技術革新を推進することができたか。</p>	<p>a：十分推進することができた。</p> <p>b：概ね推進することができた。</p> <p>c：不十分</p>

## 2. 各 論（評価結果）

### 財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発

（研究期間：平成15年度）

研究代表者：笠井 和彦（東京工業大学応用セラミックス研究所材料融合システム部門教授）

#### 研究課題の概要

新旧の木質住宅および軽量鉄骨住宅の耐震性を向上させる技術を開発する。これまでは大地震での倒壊防止・人命保護が目標であったが、本研究開発では地震後の財産保持までを目標にする。具体的には、膨大な数の戸建住宅の耐震性を高めるため、高層建築で培われてきたパッシブ制振技術を展開する。この技術は大規模建築の常識となりつつあるが、それを住宅にも健全かつ加速度的に普及させるための開発を行う。

#### 事後評価

#### 総合評価

a（非常に優れた研究であった）

戸建住宅の耐震性という極めて社会的なニーズの高いテーマについて、短期間に多くの実験研究と解析を行い、戸建住宅の制振技術の開発を進めた。効率的な小型ダンパーや制振架構の開発を行った点が評価でき、今後は、既存建物への適用性、財産保持性にとって重要な残留変形の評価法、実用化へ向けてのコスト面での精査等さらなる研究が期待される。

#### I. 目標達成度

a（十分達成した）

既存住宅への適用方法、基礎の補強のための評価方法、現場レベルの技術者に対する開発技術の適応性の評価等についてさらに検討を深めることが期待されるが、多くの実験、解析等を緻密かつ精力的に行い、単年度の研究として当初設定した目標は十分達成したと判断される。

## Ⅱ. 研究開発計画

### a (適切であった)

住宅生産者と連携する体制を組み、効率的で綿密な研究計画を立て、制約された期間の中で着実に研究開発を実施しており、適切な研究開発計画であったと評価する。

## Ⅲ. 研究成果

### (1) 社会性

#### a (十分期待できる)

現在最も研究開発が望まれており、減災上極めて重要な戸建住宅の耐震化という課題に対して一つの解決策を与える研究開発として、高く評価することができる。既存・新築を含め、今後コスト面での追求等がさらに行われ、制振性にすぐれた住宅の普及に寄与することを期待する。

### (2) 技術革新性

#### a (十分推進することができた)

従来高層建築物に適用されていた制振技術を発展させ、簡単な原理に基づいて、軽量構造物である戸建住宅に適した各種の新しい小型制振装置の開発等を行い、成果をあげた点を評価する。

# 圧電高分子膜による軽量遮音パネルの研究開発

(研究期間：平成15年度)

研究代表者：山本 貢平（財団法人小林理学研究所所長）

## 研究課題の概要

交通機関の車内や建築物の室内における外部騒音等の低減に資するため、ポリフッ化ビニルデン（PVDF）と呼ばれる圧電性を持つ高分子フィルムと、負性容量回路と呼ばれる簡単な電気回路を組み合わせ、軽量で安価な遮音構造壁を開発する。

本研究開発では、ドーム型のフィルムを2次元に配列した実用サイズ（1m×2m）のパネルを試作し、フィルムに電気回路を接続することで40dB以上の遮音性能を目指す。

## 事後評価

### 総合評価

b（優れた研究であった）

圧電高分子膜という特殊技術の展開が期待された研究開発であるが、実用サイズのパネルの性能確保について当初の目標が達成出来なかった。非電気制御型という当初構想とは違った方向で見通しが得られたことは評価するが、圧電現象の利用について建設分野での適用可能性を再度検証し、実用化に向けた研究開発を期待する。

## I. 目標達成度

c（達成しなかった）

当初設定した圧電高分子膜による大型パネルの開発という目標が達成されておらず、解決の見通しが明らかにされずに終わった点は、目標達成度として不十分と評価する。

## Ⅱ. 研究開発計画

b (おおむね適切であった)

共同研究者に土木・建築の専門分野の研究者を含むなど、研究体制の面で考慮すべき点があったと考えられる。実用化の姿を描いて、実際の遮音壁への適用を考慮した実験計画が必要であったと考えられる。

## Ⅲ. 研究成果

### (1) 社会性

b (概ね期待できる)

低周波音への対応技術を開発した社会的意義は大きいが、パネルの大きさの限界と形状の特異性から、現段階では一般的な建設技術への適用性は低いと考えられる。

### (2) 技術革新性

b (概ね推進することができた)

圧電高分子膜を遮音に活用し、遮音パネルの開発に取り組んだ点には革新性は認められるが、建設分野での実用化には未だ検討が必要な段階と言える。建設分野以外の小規模な装置や特殊な装置の低周波遮音の手法としては将来性が考えられる。

# 鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発

(研究期間：平成15年度)

研究代表者：廣瀬 壮一（東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻教授）

## 研究課題の概要

鋼橋をはじめとして多くの鋼構造物の溶接部に疲労損傷が発生しており、溶接部内部の欠陥を効率的に高精度で診断するための探傷技術を開発することは喫急の課題である。そこで、本研究では、損傷箇所や欠陥形状を画面上で三次元表示できるような超音波探傷器の開発を目標としている。これによって、鋼構造物内の欠陥探傷精度が格段に向上すると考えられ、これまでのような検査技術者の主観的判断によらない客観的な構造物の診断が可能となる。

## 事後評価

### 総合評価

b（優れた研究であった）

超音波探傷の3次元化など革新的な面が評価されるが、構造物の損傷度診断ができる超音波探傷技術の開発という目標に対して、成果を実用化につなげるにはまだ課題が多い段階と言える。開発された技術の精度の定量的検証をもとに、更なる研究の発展を期待する。

## I. 目標達成度

b（概ね達成した）

損傷が上下に重なった場合の干渉の問題など、実用化にはまだ解決しなければならない課題が多いが、欠陥形状の3次元画像化を行ったことや非破壊試験への展開の可能性が見られるなど、ある程度の目標は達成したと評価される。

## Ⅱ. 研究開発計画

b (おおむね適切であった)

初年度に予定されていた研究の目標達成度が十分でなかった。研究着手時1年で成果が得られる研究計画に焦点を絞るような配慮が必要であったと考えられる。研究体制については、共同研究者の具体的な貢献度が不明瞭であった。

## Ⅲ. 研究成果

### (1) 社会性

b (概ね期待できる)

鋼構造物内部の欠陥の探傷は重要な課題であり、高精度の実用化探傷技術を開発するという目標に対する社会的期待は高い。実用化という目標に対しては本研究の成果は初期段階に留まっているとはいえ、欠陥形状を目で見てわかる画像として表示するなどの研究開発の進展を評価する。

### (2) 技術革新性

a (十分推進することができた)

新たな技術開発に取り組んでおり、3次元探査の活用等に一定の道筋を与え、従来の超音波技術より高精度の欠陥探査が可能となることが期待される。実用性の点では未知の面があるが、実用化に向けた研究の今後の発展を期待したい。

### 3. 参 考

#### 建設技術研究開発助成制度 平成15年度終了課題事後評価要領

(平成17年2月22日建設技術研究開発助成制度評価委員会決定)

##### 1. 事後評価方針

本制度は、建設分野の技術革新を推進するため、国土交通省の所掌する建設技術の高度化及び国際競争力の強化等に資する研究開発を提案公募により研究開発活動に携わる者から広く募り、建設技術研究開発助成制度評価委員会（以下、「委員会」という。）において、社会性、技術革新性及び実現可能性並びに総合技術開発プロジェクト（以下「総プロ」という。）関連分野課題については総プロによる研究開発との適合可能性の視点から総合的に評価した上で、優秀な提案について研究開発費を助成するものである。

実施課題の事後評価は、「国土交通省研究開発評価指針」（平成14年6月、国土交通省策定）に基づき、専門的な視点から詳細かつ厳正に実施する。そして、その結果は、広く公表するとともに、今後の本制度の運営に反映させる。

##### 2. 事後評価対象

平成15年度終了課題（別紙1）

##### 3. 事後評価項目及び評価基準

事後評価項目は、総合評価、目標達成度、研究開発計画、研究成果（社会性、技術革新性）とする。また、各項目の観点から、別紙2のようにa, b, cのいずれかを付す。また、必要に応じて、評価において特に重視した観点など、定性的な評価を項目ごとにコメントを付記することとする。

##### 4. 事後評価手順

(1) 各課題の研究代表者は、平成17年2月15日（火）までに、以下の資料を(①及び②)を国土交通省大臣官房技術調査課（以下、「事務局」という。）までに提出する。

① 研究開発成果報告書の概要（A4版）

- ・ 研究目標の概要・成果の概要（様式1（略）で5枚まで）
- ・ 研究成果公表等の状況（様式2（略）で3枚まで）

② 自己評価表（様式3（略）で3枚まで）

(2) 事務局は、研究開発成果報告書及び提出された資料をとりまとめ、委員会の各委員宛に送付する。

(3) 各委員は、(2)で送付された研究開発成果報告書、研究開発成果報告書の概要及

び自己評価表を事前に査読する。

- (4) 委員会は、ヒアリングを実施し、(2)の資料にもとづく研究代表者（研究代表者がやむを得ずヒアリングに出席できない場合には、研究代表者の委任を受けた代理発表者1名）によるプレゼンテーション、及び事務局が用意する資料（採択時に提出された研究開発計画、所要経費一覧）をもとに、質疑応答を行う。（具体的には、各説明ごとに、説明時間は20分、質疑応答は15分で、3課題で合計95分。）
- (5) 評価委員は、後日事務局から電子メールで送付される課題評価調書（資料10（略））に記入し、その評価結果を平成17年3月4日（金）までに事務局へ返送する。（ヒアリング欠席の評価委員についても、評価の提出をお願いする）
- (6) 事務局は、(5)の委員による評価をまとめて、事後評価報告書案を作成し、委員の了解を得た後に研究代表者に通知するとともに公表することとする（国土交通省ホームページで公表）。

以上

## 事後評価対象課題

## 【一般分野】

	研究開発年度	課題名	研究代表者（所属）
1	平成15年度	財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発	笠井 和彦 （東京工業大学応用セラミックス研究所材料融合システム部門教授）
2	平成15年度	圧電高分子膜による軽量遮音パネルの研究開発	山本 貢平 （財団法人小林理学研究所所長）

## 【総合技術開発プロジェクト関連分野】

	研究開発年度	課題名	研究代表者（所属）
5	平成15年度	鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発	廣瀬 壮一 （東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻教授）

## 事後評価項目及び評価基準

<p><u>総合評価</u></p> <p>評価の観点： ・以下の項目を総合的に評価</p>	<p>a：非常に優れた研究であった。 b：優れた研究であった。 c：優れた研究ではなかった。</p>
<p><u>I. 目標達成度</u></p> <p>評価の観点： ・当初の目標を達成することができたか。</p>	<p>a：十分達成した。 b：概ね達成した。 c：達成しなかった。</p>
<p><u>II. 研究開発計画</u></p> <p>評価の観点： ・研究開発計画、経費、研究開発体制等の計画が適切であったか。</p>	<p>a：適切であった。 b：おおむね適切であった。 c：不適切であった。</p>
<p><u>III. 研究成果</u></p> <hr/> <p><u>(1) 社会性</u></p> <p>評価の観点： ・研究開発の成果が実用化されることにより、単に社会資本整備の分野にとどまらず、国民生活、経済活動への波及効果が期待できるか。</p> <hr/> <p><u>(2) 技術革新性</u></p> <p>評価の観点： ・学術的研究及び特許等に係る技術の応用・改良等をもって、既存の建設分野の技術に比べて相当程度の技術革新を推進することができたか。</p>	<hr/> <p>a：十分期待できる。 b：概ね期待できる。 c：期待できない。</p> <hr/> <p>a：十分推進することができた。 b：概ね推進することができた。 c：不十分</p>

## 平成16年度建設技術研究開発助成制度評価委員会名簿

(平成17年2月22日現在)

- 委員長 濱田 政則 (早稲田大学理工学部教授)
- 副委員長 友澤 史紀 (日本大学理工学部教授)
- 委員 池田 駿介 (東京工業大学大学院理工学研究科教授)
- // 宇佐美 勉 (名古屋大学大学院工学研究科教授)
- // 小谷 俊介 (千葉大学工学部教授)
- // 嘉門 雅史 (京都大学大学院地球環境学堂教授)
- // 神崎 正 (香川大学工学部教授)
- // 小松 利光 (九州大学大学院工学研究院教授)
- // 佐藤 滋 (早稲田大学理工学部教授)
- // 西川 孝夫 (東京都立大学大学院工学研究科教授)
- // 長谷見雄二 (早稲田大学理工学部教授)
- // 服部 岑生 (千葉大学大学院自然科学研究科教授)
- // 前川 宏一 (東京大学大学院工学系研究科教授)
- // 森地 茂 (政策大学院大学教授)
- // 吉野 博 (東北大学大学院工学研究科教授)

(以上敬称略、五十音順)

## Ⅱ. 参考資料（研究開発成果報告書の概要／自己評価）

課 題 名：財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発 研究代表者：笠井 和彦（東京工業大学）
--

### 研究目標の概要・成果の概要

#### 【研究目標の概要】

新旧の木質住宅および軽量鉄骨住宅の耐震性を向上させる技術を開発する。これまでは大震災での倒壊防止・人命保護が目標であったが、本研究開発では地震後の財産保持までを目標にする。具体的には、膨大な数の戸建住宅の耐震性を高めるため、高層建築で培われてきたパッシブ制振技術を展開する。この技術は大規模建築の常識となりつつあるが、それを住宅にも健全かつ加速度的に普及させるための開発を行う。

現状では免震の住宅への適用例は多くなったが、制振においては未だ初期の段階にある。ただし、住宅制振に言及するコマーシャルや記事も最近出始めており、免震に比べ低いコストの制振に関する興味は、かなり増加したと言ってよい。このような状況で、様々なダンパーや架構形式を開発することで納まりや性能のバリエーションを増やし、また制振効果の確保のため必要な種々の技術的配慮を明示する本研究開発は、時流に即した重要なものであると思われる。

木質住宅では典型的な軸組み形式を対象とし、新築・既存住宅の在来耐震壁に代わる制振システムを開発する。軽量鉄骨住宅では、既に量産されているプレファブ形式に対し、制振導入のための最小限の変更を施す。即ち、木質および軽量鉄骨架構の力学特性を加味した接合法の開発、低コスト小型制振ダンパーの開発、短周期領域での地震応答やその抑制法について、接合部、ダンパー、制振システムそれぞれの詳細な実験と解析により探求し、応答低減・損傷制御に優れた戸建制振住宅の開発を行う。

#### 【研究成果の概要】

本研究開発は、現状技術の調査、制振装置と架構の開発、76体の接合部試験体の静的載荷実験、13体の制振架構の動的載荷実験、および20体の多スパン3次元制振構造の振動台実験、そして動的評価法と設計法の開発からなる。成果を研究開発の流れに沿って示す。なお、図番号は、成果報告書の図番号に対応している。

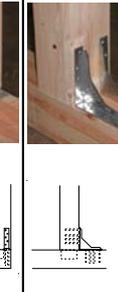
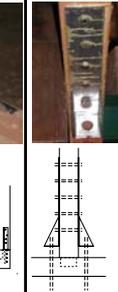
(1) 木造および軽量鉄骨架構に適用する低コスト・小型ダンパーの開発

木造制振構造に対しては粘弾性、鋼材、摩擦材（ブレーキパッド）を用いた小型のダンパーを、軽量鉄骨制振構造に対しては粘弾性、摩擦材を用いた小型ダンパーを独自に開発した。詳細は本報告書の第Ⅱ編 3章、第Ⅲ編 3章に示した。

(2) 木造架構の在来接合金物の応用および新金物の提案

既往の接合金物を用いて制振架構を構成する場合、せん断力、引張力を確実に伝達でき、なおかつダンパーへの変形伝達を阻害する接合部変形を極力抑えられるものを選択する必要がある。表 2-1 に示すように 76 体の試験体を用いて引張、せん断、曲げの静的実験を行い、各力に対する接合部の力学的挙動を把握した。実験結果を第Ⅱ編 2章に示した。この研究成果を踏まえ開発した制振装置と一体型の新金物を、第Ⅱ編 3章に示した。

表 2-1 柱・横架材接合部試験体一覧(木造) [( )内は単調載荷の試験体数]

試験体名	短ほぞ	かすがい	2枚ハンチ型		内使いL型	1枚ハンチ型	ホールダウン
			2枚ハンチ型(1)	2枚ハンチ型(2)			
試験体形状							
引張実験	—	4 (1)	4 (1)	4 (1)	4 (1)	—	4 (1)
せん断実験	4 (1)	4 (1)	5 (2)	5 (2)	5 (2)	—	—
曲げ実験	4 (1)	4 (1)	5 (2)	5 (2)	5 (2)	5 (2)	5 (2)

(3) 木造制振架構の開発・設計および強制変形動的実験

上記(1),(2)の成果を組み合わせる6体の木造制振架構を提案した。そのうちの2体、粘弾性ダンパーを合板を介して設置したVP試験体と粘弾性ダンパーをK型ブレースを介して設置したVK試験体とを図 3-1-1(a),(b)に示した。6体の実験結果よりその性能が優れていること、設計法が十分な精度を有しており、妥当なものであることを第Ⅱ編 3章に示した。

(4) 木造制振構造の応答評価法および振動台実験

上記(3)で提案した架構を有する多スパン3次元木造制振構造の試験体を作製し、振動台実験によりその性能を把握するとともに有効性を示した。またその応答評価法の妥当性も示した。試験体の基本となる形状を図 4.1-1 に示す。加振方向には3構面あるが、中央の構面が試験部分であり、そこには3スパンあるため壁要素の組み合わせに自由度をもたせることができた。両外側の構面は柱が2本ずつ、かすがいにより横架材と接合されており、水平せん断力をほとんど負担しない構造とした。また、加振方向に直交に、ねじれ拘束用ブレースが存在するが、これが中央試験構面の柱の軸方向変位を拘束することがないように

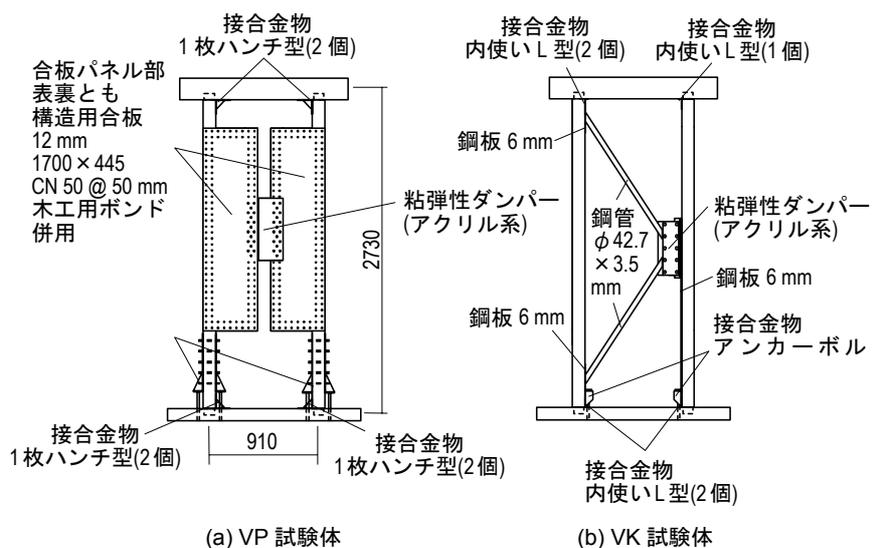


図 3-1-1 木質制振架構の試験体（木造）

工夫した。さらに試験構面の柱の長期軸力も実在住宅の軸力分布を調べ、それと同等になるように工夫した。この他にも、入力加振波の補償加振や緻密な計測など、様々な要素に細心の注意を払いながら振動台実験を行った。また、応答評価法の提案とその精度に関しても検討を行った。

試験体は表 4.1-1 に示すように計 13 体設計した。提案した木造制振壁は既存耐力壁と比べ高い性能を有していること、評価法が十分な精度を示し、妥当なものであることなどを第 II 編 4 章に示した。

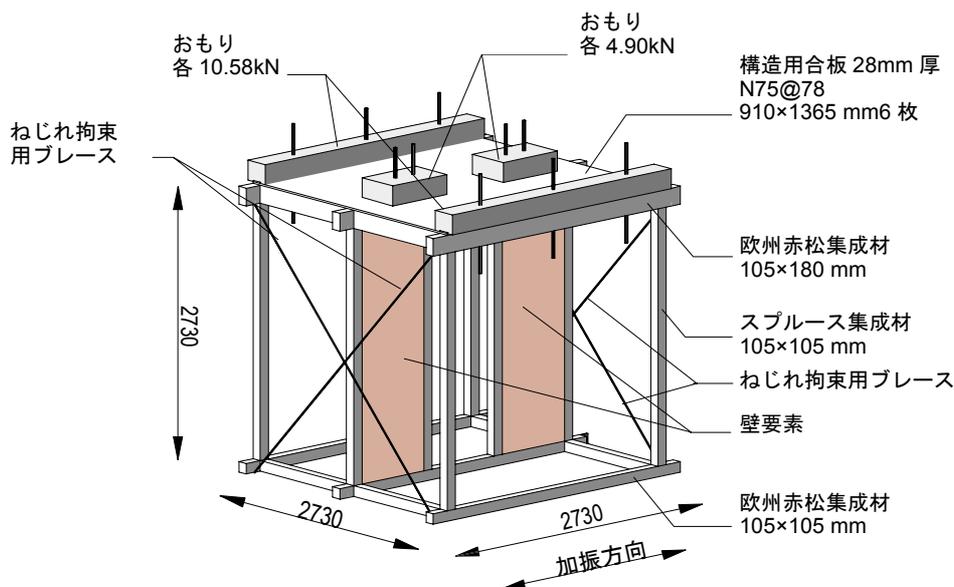


図 4.1-1 振動台用試験体概要（木造）

表 4.1-1 振動台実験用試験体一覧（木造）

No.	1	2	3	4	
既存					
試験体名	WB-WB	WB-WB(M)	WP-WP	WP-WP(4G)	
架構	筋かい(釘打ち)	筋かい(接合部補強)	構造用合板	構造用合板(石膏ボード)	
壁量	$(1.5 \times 1P + 1.5 \times 1P) \times 0.67$	$1.5 \times 1P + 1.5 \times 1P$	$3.0 \times 1P + 3.0 \times 1P$	$3.5 \times 1P + 0.5 \times 2P + 3.5 \times 1P$	
$T_0$ (s)	0.59	0.41	0.25	0.16	
$h_0$	0.10	0.08	0.06	0.05	
No.	5	6	7	8	9
制振					
試験体名	VP-VP	VK-VK	SP-SP	SK-SK	FK-FK
架構	粘弾性ダンパー合板型 粘弾性ダンパー合板型	粘弾性ダンパーK型 粘弾性ダンパーK型	鋼材ダンパー合板型 鋼材ダンパー合板型	鋼材ダンパーK型 鋼材ダンパーK型	摩擦ダンパーK型 摩擦ダンパーK型
壁量	$5.0 \times 1P + 5.0 \times 1P$	$5.0 \times 1P + 5.0 \times 1P$	$5.0 \times 1P + 5.0 \times 1P$	$5.0 \times 1P + 5.0 \times 1P$	$4.0 \times 1P + 4.0 \times 1P$
$T_0$ (s)	0.30	0.31	0.30	0.32	0.22
$h_0$	0.19	0.25	0.03	0.03	0.04
No.	10	11	12	13	
制振+既存					
試験体名	VK-WP	VB-VB(WP)	SK-WP(2)	FK-WP	
架構	粘弾性ダンパー合板型 構造用合板	粘弾性ダンパー方材型×2 構造用合板	鋼材ダンパーK型 構造用合板両面	摩擦ダンパーK型 構造用合板	
壁量	$5.0 \times 1P + 3.0 \times 1P$	$2.0 \times 1P + 3.0 \times 1P + 2.0 \times 1P$	$5.0 \times 1P + 3.0 \times 2P$	$4.0 \times 1P + 3.0 \times 1P$	
$T_0$ (s)	0.30	0.31	0.26	0.23	
$h_0$	0.14	0.09	0.04	0.04	

(5) 軽量鉄骨制振架構の開発と強制変形動の実験および振動台実験

本研究で選択した既往軽量鉄骨架構は、元来引張ブレースにより構面を構成するもので、某プレファブメーカーの量産品である。接合部はほとんど曲げモーメントを伝達できない。これに制振システムを組み込み、ダンパーへの変形伝達を確実にを行う目的で、柱および各接合部の剛性を高める改善方法を開発した（図 3-6）。その後、木造と同様に制振架構の強制変形加振を行ってその性能の把握と有効性を示し、さらにこの制振壁を組み込んだ 3 次元軽量鉄骨制振構造の振動台実験を行い（図 4-3）、既存軽量鉄骨造と比較して高い性能を有していること、評価法が十分な精度を有しており、妥当なものであることなどを第 III 編 3 章に示した。

(6) 特許の出願状況

知的所有権を取得することは、本研究の成果である住宅制振技術を低コストで供給する上でも必要であり、ひいては全国的な普及にも貢献できると考えられる。木造住宅制振の特許については、以下を出願中であり、軽量鉄骨造の制振については、出願準備中である。

「木造建物の制振装置及び木造建物の制振方法」特願 2005-21975

「木造建物の制振構造及び木造建物の制振方法」特願 2005-21980

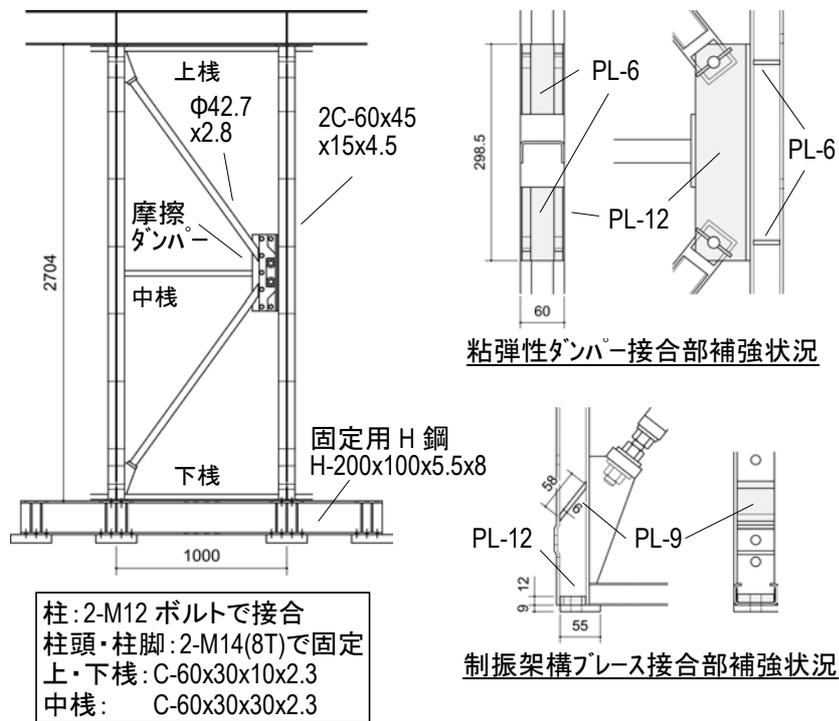


図 3-6 粘弾性ダンパー制振架構と接合部補強状況（軽量鉄骨）



図 4-3 振動台実験試験体の設置状況（軽量鉄骨）

## 研究成果公表等の状況

### 【研究成果発表等】

	原著論文による発表	左記以外の紙上発表	口頭発表	合 計
国 内	13(2) 件	0 件	0 件	13(2) 件
国 外	0 件	0 件	0 件	0 件
合 計	13(2) 件	0 件	0 件	13(2) 件

(注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと)

### 【主要雑誌への研究成果発表】

雑 誌 名	時 期	出版社
日本建築学会構造系論文集（4編）	（投稿中）	日本建築学会
2004年日本建築学会学術講演梗概集（10編）	平成16年7月	日本建築学会

注) 上記成果について一覧を以下に示す。

- 1) 笠井和彦, 和田章, 坂田弘安, 緑川光正, 大木洋司, 中川徹, 変位依存ダンパーをもつ木質架構の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中)
- 2) 坂田弘安, 笠井和彦, 和田章, 宮下健: 合板パネルによるシアリンク機構を用いた木質制振架構の動的挙動に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中)
- 3) 坂田弘安, 笠井和彦, 和田章, 緑川光正, 大木洋司, 中川徹, 速度依存ダンパーをもつ木質架構の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中)
- 4) 笠井和彦, 坂田弘安, 和田章, 宮下健: K型ブレースによるシアリンク制振機構を用いた木質制振架構の動的挙動, 日本建築学会構造系論文集 (投稿中)
- 5) 笠井和彦, 和田章, 緑川光正, 坂田弘安, 大木洋司: 財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発 その1 研究の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.115-116, 2004年9月
- 6) 岩崎啓介, 笠井和彦, 大木洋司: 財産保持性に優れた戸建制振住宅に関する研究開発 その2 制振性能の理論的評価方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.117-118, 2004年9月
- 7) 宮下健, 笠井和彦, 坂田弘安, 永井潔, 金建二: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その3 繰返し荷重下における接合部剛性・耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.119-120, 2004年9月
- 8) 下田智博, 笠井和彦, 坂田弘安, 宮下康信: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その4 シアリンク型粘弾性ダンパーを用いた制振壁, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.121-122, 2004年9月
- 9) 宮下康信, 笠井和彦, 坂田弘安: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その5 シアリンク型粘弾性ダンパーを用いた制振壁(2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.123-124, 2004年9月
- 10) 威務柏, 笠井和彦, 大木洋司, 宮下健, 岩崎啓介: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開

- 発の経過報告 その 6 シアリンク型鋼材ダンパーを用いた制振壁, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.125-126, 2004 年 9 月
- 11) 大木洋司, 笠井和彦, 岩崎啓介: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その 7 方杖型粘弾性ダンパーを用いた制振壁, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.127-128, 2004 年 9 月
  - 12) 中川徹, 和田章, 緑川光正, 坂田弘安, 五十田博, 山下忠道: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その 8 振動台実験の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.129-130, 2004 年 9 月
  - 13) 山下忠道, 笠井和彦, 大木洋司, 中川徹, 金井健二: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告 その 9 振動台実験における架構の動的性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.131-132, 2004 年 9 月
  - 14) 永井潔, 笠井和彦, 和田章, 緑川光正, 五十田博: 財産保持性に優れた制振住宅に関する開発の経過報告: その 10 基礎耐力の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.133-134, 2004 年 9 月

## 【その他】

(ホームページでの公開、研究開発成果の特許出願、成果の普及・実用化に向けた体制整備等、その他の取り組みについて自由記述)

### ホームページでの公開

ホームページのように不特定多数が閲覧できる情報媒体に研究開発成果を公表し、戸建住宅への制振技術の健全な普及を促進することは、重要であると考えている。特許取得との時間的な関連を考慮し、東京工業大学建築物理研究センターのホームページ内において成果を公表すべく準備する予定である。

### 研究開発成果の特許出願

知的所有権を取得することは、本研究の成果である住宅制振技術を低コストで供給する上でも必要であり、ひいては全国的な普及にも貢献できると考えられる。制振技術の健全な普及を促進するためにも大きな役割を果たすものと考えている。

木造住宅制振の特許については、以下を出願した。

「木造建物の制振装置及び木造建物の制振方法」特願 2005-21975

「木造建物の制振構造及び木造建物の制振方法」特願 2005-21980

軽量鉄骨造の制振については、出願準備中である。

### 成果の普及・実用化に向けた体制整備

執行当初から本プロジェクトは、第一線と評価されている住宅金物メーカー、プレハブメーカーと協力して進めてきたもので、高性能で施工性が良い制振壁の開発を行うことができたため、現段階でも実用化の目処がたっている。これを普及させるために、コスト面、生産体制、供給体性などに関してより綿密な詰めを前述の住宅関連会社と始めている。

さらに新たに、性能や施工性に関連してメニューを増やすべく、大学研究者、行政側研究者、住宅金物メーカー、プレハブメーカーをメンバーとしたこれまでの「戸建制振住宅研究会」を定期的に行う体制を維持している。本プロジェクトの時間の都合上、これまで協力を依頼し研究開発を共にしてきた住宅金物メーカー、プレハブメーカーは各1社であった。今後は、より多くの住宅関連会社の参加のもと、研究会を定期的を開催してゆく予定である。

また、財産保持性に優れた戸建制振住宅の健全な普及を促すため、東京工業大学の建築・土木構造関係者からなる21世紀COE都市地震工学センターの後援で、戸建住宅を対象とした制振壁のコンペティション、いわゆる「制振壁ジャパンカップ」の開催も計画している。

## 自己評価結果

### 総合評価

【評価】 a

【コメント】木造・軽量鉄骨の戸建制振住宅に関して、小型ダンパーや制振架構の開発、応答評価法・設計法の開発など目標の達成ができたこと、筑波や大阪の専門家を含む20回以上の検討会議により開発を的確に軌道修正しながら効率よく進められたこと、本成果の国民生活・経済活動への波及効果が期待できること、既存の建設技術から脱皮した技術革新を推進できたこと、特許申請もできたことから、総合評価をaとした。

・その他に、本制度に対する意見、提案等について

【コメント】単年度のみでの研究開発で優れた成果を挙げることは大変なことである。限られた期間なので、予算の執行時期をより早くしていただけると助かる。

### I. 目標達成度について

【評価】 a

【コメント】木造および軽量鉄骨の力学特性を加味した接合法、低コスト小型ダンパー、短周期領域での応答予測・抑制法そして設計法を開発した。重要な構造要素である基礎部の制振技術への適用検討、コストの検討も行った。これら多方面からの開発や検討により、頻繁な中小地震による架構・非構造材のゆるみや劣化が無く、大地震での応答低減・損傷制御に優れた戸建制振住宅を開発できた。以上より、目標達成度の評価をaとした。

### II. 研究開発計画について

【評価】 a

【コメント】木造および軽量鉄骨造の制振技術の開発に際し、制振構造、木質構造、軽量鉄骨構造、振動台実験の各分野の専門家をメンバーとし、木造金物メーカー、住宅メーカーからもメンバーを募り20回以上の検討会議を行いながら、目標を達成すべく適切な体制を維持できた。期間が短いので急ぐため、出費が多くなったこともあったが、経費の計画はほぼ適切だった。以上を総合的に判断して、研究開発計画の評価をaとした。

### Ⅲ. 研究成果について

#### (1) 社会性

【評価】 a

【コメント】制振技術が、我国の建物の大部分を占める新旧の戸建住宅に多用され、都市災害の大小を決める個々の住宅被害を最小化することで、個人的・国家的な経済損失、都市の経済活動の低下を防ぐことができる。一方、低コスト・高性能な本技術の知的所有権を獲得することで自治体の耐震改修補助制度を強力に推進する一助となる。さらに、これらの技術に関する新しい産業が生まれ、雇用の機会が増える。以上より、社会性の評価を a とした。

#### (2) 技術革新性

【評価】 a

【コメント】木造や軽量鉄骨造のように特異性をもつ構造を高効率な制振構造とする技術を開発した。膨大な量の接合部実験に基づく構法の開発、レベル 3 相当の極大地震でも損傷しない制振システムの開発と多数の構造検証実験、システムの設計法と応答評価法などが主たる成果である。このように制振構造に関して新構法から設計手法まで一貫して提案・実証した研究はこれまでにない。また、本技術で制振が普及すれば住宅が壊れにくくなり、省資源や地球温暖化問題の解決への一つの原動力ともなる。以上から、技術革新性の評価を a とした。

課題名：圧電高分子膜による軽量遮音パネルの研究開発  
研究代表者：山本 貢平（財団法人小林理学研究所）

## 研究目標の概要・成果の概要

### 【研究目標の概要】

この研究の出発点は、圧電性をもつ高分子フィルムの弾性が負性容量と呼ぶフィードバック回路を結合させると見かけ上無限大に近づくという発明である。

ポリフッ化ビニリデン（PVDF と略称する）の分極処理したフィルムは、応力を加えると電気分極を生じ（圧電正効果）、電界を加えると弾性歪を生ずる（圧電逆効果）。湾曲した形の PVDF のフィルムに音が入射すると、フィルムは面内の伸縮振動をおこすと同時に交流電気分極を発生する。フィルムの両面の電極に誘起される電荷を電気回路で増幅して、位相を逆にして電極にフィードバックする（負性容量回路の働き）。するとフィルムの面内に逆位相の伸縮振動が生じ、音による振動を打ち消してしまう。フィルムの振動がゼロになれば、フィルムを通る音の伝達もゼロになる。

この原理は面積約  $20\text{cm}^2$  の PVDF フィルムを音響管に設置した場合には、見事に成功した。単一周波数（たとえば  $1\text{kHz}$ ）では音響透過損失（Transmission Loss、TL）の増加が  $60\text{dB}$  に達し、ほとんど完全に音の伝達を遮断した。また、PVDF を積層して多重膜とし、回路を改良することによって  $200 \sim 2000\text{Hz}$  の周波数領域で、連続して約  $20\text{dB}$  の TL の増加が得られた。

電気回路を結合しない状態でも、フィルムが湾曲した形を持つ効果によって、TL は  $1000\text{Hz}$  で  $15\text{dB}$ 、 $200\text{Hz}$  で  $40\text{dB}$  となり、TL が周波数の減少とともに増加する特性が得られた。通常の遮音材料では質量に比例して TL が大きくなるため、周波数の増加とともに TL が増加する（質量則と呼ぶ）。これに反して、湾曲状フィルムでは、弾性率に比例して TL が大きくなるため、弾性則が成り立つ。弾性則に従う遮音の場合には、周波数の減少とともに TL が増加する特性をもつ。

通常の方法は質量則に従うため、低周波での遮音が困難である。しかし湾

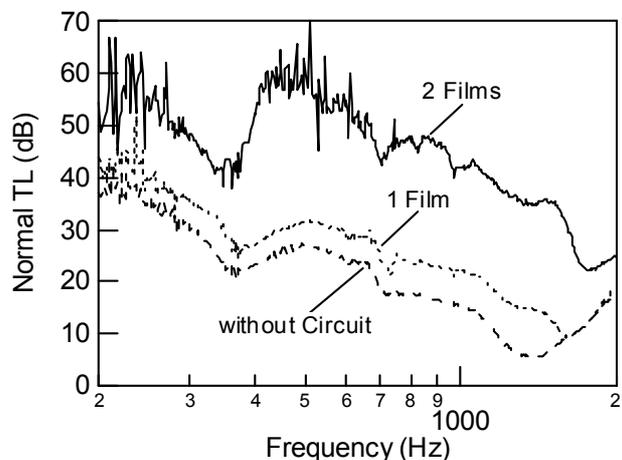
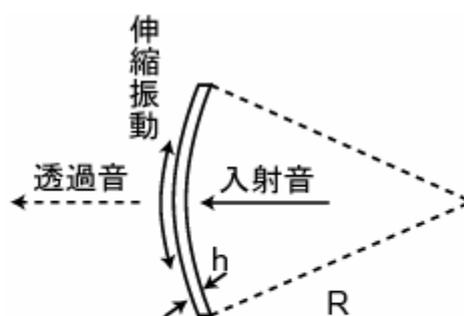


図1 フィルムの2重化による透過損失の向上

曲フィルムによる遮音は弾性則に従うため、低周波になるほど有効である。また薄いフィルムは軽量である利点もある。音響管による基礎研究の成果は、軽量で湾曲した形を持つフィルムが 100 ~500Hz の低周波領域でよい遮音特性をもつこと、圧電フィルムではその弾性率を、したがって遮音効果を電氣的に制御することが可能であることを明らかにしたことである。

この研究を応用に役立たせるためには、フィルムの面積を 20cm<sup>2</sup> (0.002m<sup>2</sup>) から実用に近い大面積に拡張することが必要である。そのためにまず面積が A4 サイズの小型遮音パネル、次に面積が約 2m<sup>2</sup> の大型遮音パネルを製作することが、本開発研究の目的になった。



湾曲フィルムの音響インピーダンス

$$|Z| = \left| \underbrace{\frac{Yh}{\omega R^2}}_{\text{弾性則}} - \underbrace{\omega \rho h}_{\text{質量則}} \right|$$

Y: 弾性率, h: 厚さ, R: 曲率半径  
 ρ: 密度, ω: 角周波数

透過損失

$$TL = 10 \log_{10} \left[ 1 + \frac{Z^2}{(2c_0 \rho_0)^2} \right]$$

c<sub>0</sub>: 空気の音速, ρ<sub>0</sub>: 空気の密度

添図 湾曲フィルムの音響インピーダンスと透過損失

### 【研究成果の概要】

図2は、湾曲した PVDF フィルムとウレタンフォームを組み合わせる試作した A4 サイズのパネルを示す。両側の PVDF 圧電フィルムを2枚重ねたフィルムは中央に圧縮して入れたウレタンフォームのために外側へドーム状に湾曲した形を保つ。PVDF フィルムの厚さは 40 ミクロン、曲率半径は約 30cm である。

図3は前面の PVDF フィルムに結合したフィードバック用の負性容量回路と後面の PVDF フィルムに結合した二次増幅器の回路を示す。前面のフィルムを透過した音を、さらに後面のフィルムで遮断する工夫が加えられている。

パネルの遮音特性の測定には、厳格を期して残響室でのインテンシティ音響透過損失測定法 (ISO 15186) を用いた。パネルの透過損失 (TL) の周波数依存性の一例が図4に示されている。回路を結合しない場合は、300Hz で TL は最小値 12dB になり、周波数の増加とともに、質量則にしたがって増加する。又周波数の減少とともに、弾性則にしたがって増加する。測定の制約のため 100Hz 以下は測定されていないが、100Hz 以下の周波数では 30dB 以上に増加することが予想される。回路を結合した場合には、PVDF の見かけの弾性率が增大するため、TL も増加する。この増加分を入れると、パネルの遮音特性は 110~1000Hz の領域で約 30dB の TL を示した。

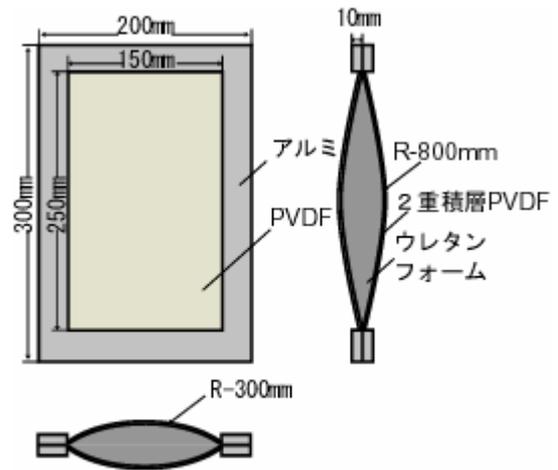


図2 2重積層膜を用いた小型パネル

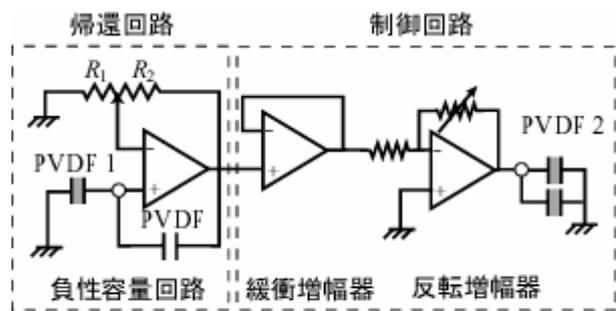


図3 制御回路

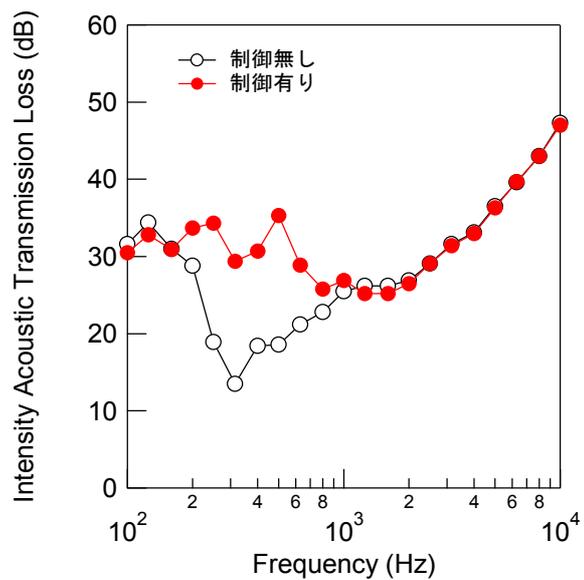


図4 小型パネルの音響インテンシティ透過損失

湾曲状フィルムの弾性則による遮音は、PVDF 以外のプラスチックフィルムでも実現できる。理論的にはフィルムの厚さが大きいほど、また曲率半径が小さいほど、透過損失 TL は大きくなる。廉価な汎用プラスチックであるポリエチレンテレフタレート (PET) の厚さ 1.5mm の湾曲板を用いて図2と同様な A4 サイズのパネルを試作した。両面の PET 板の曲率半径は約 30cm である。図5は湾曲 PET パネルの TL の周波数依存性を示す。TL は約 400Hz で最小値 29dB を取る。高周波側では、質量則にしたがって、周波数の増加とともに TL が増加し、低周波側では、弾性則にしたがって、周波数の低下とともに TL が増加する。100Hz 以下は測定されていないが、約 35dB 以上の TL の値が期待される。PET 板が湾曲せず平板の場合の結果も付記してあるが、TL の値は約 15dB 小さい。この差が湾曲の効果である。平板に音が入射すると板の厚み振動が起こるがその振幅は小さい。しかし湾曲板に音が入射すると、板の平面内で長さ方向の大きい伸縮振動が起こる。この弾性エネルギーに音のエネルギーが変換されるのである。

面積約 2m<sup>2</sup> の遮音パネルを A4 サイズのパネルを 30 個並列に並べて試作した。パネルを取り付ける大型枠の設計にはコンピューターによる強度計算を行って形状を定めた。PVDF の場合の測定結果を図6に示す。A4 サイズの遮音特性が大型パネルでも再現されることを期待したが、回路の効果はほとんど見られなかった。この理由は、パネルの製作と回路の製作がすべて手作りで行われたため、30 個のパネルに同じ性能を持たせることに失敗したためである。一個のパネルでも音を通せば、全体のパネルの性能が落ちるという厳しい条件であった。

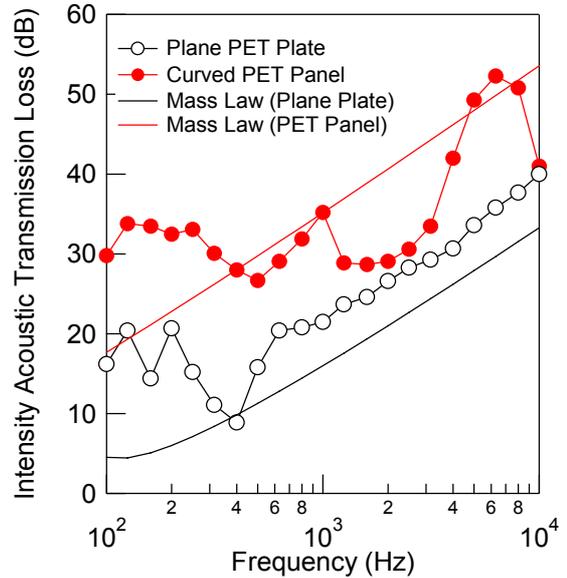


図5 湾曲PETパネルとPET平板のインテンシティ透過損失

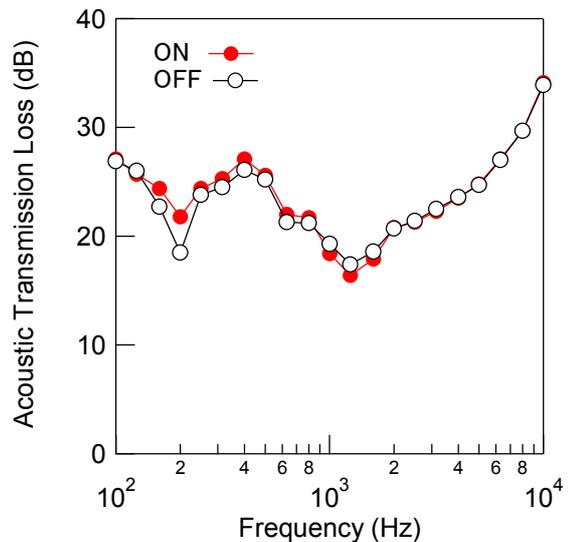


図6 大型パネルの音響透過損失

図7はPETパネルを30個並列に設置した場合の結果である。この場合には、A4パネルとほとんど同様の遮音特性が得られた。TLの値は約250Hzに最小値があり、100Hz以下の低周波では30dB以上になる傾向を示している。

図7の結果は新しい低周波遮音パネルの実現性を示唆する。PET板の厚みは約1.5mm、曲率半径は約30cm、小型パネルの面積は約500cm<sup>2</sup> (0.05m<sup>2</sup>)である。廉価軽量で簡単な設計であり、実用化への出発点になると考える。今後、PET以外の材料の選択も含め、厚さと曲率半径および固定条件の最適化などによって、低周波音領域で30dB以上の透過損失を持つ更に良い大型パネルを実現する可能性がある。

図8に通常の遮音材料とPETを用いた大型パネルについて、透過損失TLの大きさおよび周波数依存性の比較を示す。普通の材料としては、鉄板(0.7mm厚)、ガラス板(10mm厚)、コンクリート(120mm厚)を文献から取り上げた。試作したPET大型パネルはガラス板とコンクリートの中間にあるが、最大の相違は、250Hz以下の低周波でTLが増加することである。100Hz以下の遮音には、弾性則に従うPET大型パネルが大きな効果を発揮するに違いない。現在その確認のために、鉄板で遮蔽した大型音響箱の出口にPET A4パネルを取り付け、100Hz以下での透過損失の増加を測定中である。

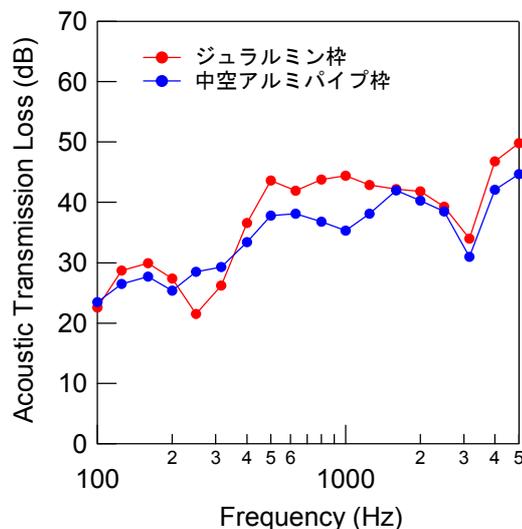


図7 大型PETパネルの音響透過損失

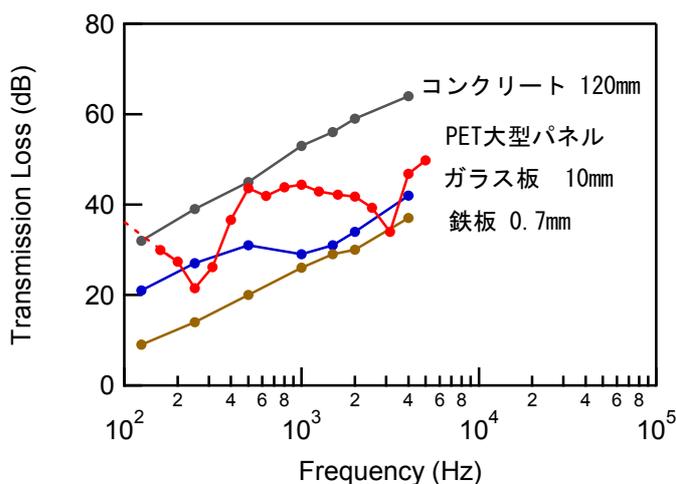


図8 通常の遮音材料とPETパネルの透過損失の比較

## 研究成果公表等の状況

### 【研究成果発表等】

	原著論文による発表	左記以外の紙上発表	口頭発表	合 計
国 内	0 件	1 件	0 件	1 件
国 外	( 1 ) 件	0 件	4 件	4 ( 1 ) 件
合 計	( 1 ) 件	1 件	4 件	5 ( 1 ) 件

(注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと)

### 【口頭発表（国外）】

1. “Acoustic Barrier using Elasticity Control of Piezoelectric Polymer Films”, H. Kodama, K. Kimura, T. Okubo, K. Yamamoto, M. Date and E. Fukada, The 18<sup>th</sup> International Congress on Acoustics (ICA 2004), Kyoto, Japan.
2. “Sound Barrier Panels Using Piezoelectric Polymer Films”, K. Kimura, H. Kodama, T. Okubo, K. Yamamoto, M. Date and E. Fukada The 18<sup>th</sup> International Congress on Acoustics (ICA 2004), Kyoto, Japan.
3. “Sound Shielding of Piezoelectric PVDF Panel”, H. Kodama, T. Okubo, K. Kimura, K. Yamamoto, M. Date and E. Fukada, Internoise 2004, Prague, Czech Republic.
4. “Elasticity Control of Curved Piezoelectric Polymer Films”, E. Fukada, M. Date, H. Kodama and Y. Oikawa, ICAPD 7, Liberec, Czech Republic.

### 【紙上発表（国内）】

1. 「曲率をもつプラスチックの弾性による遮音について」, 児玉秀和, 制振工学研究会 会報31号 (Vol.17, No.1).

### 【原著論文による発表（国外）】

1. “Elasticity Control of Curved Piezoelectric Polymer Films”, E.Fukada, M.Date, H.Kodama, and Y. Oikawa, Ferroelectrics 2005 (in print) .

### 【主要雑誌への研究成果発表】

雑 誌 名	時 期	出版社
なし		

## 【その他】

- ・ ホームページでの公開

本研究に関する情報を当研究所ホームページで公開。

- ・ 研究開発成果の特許出願

本研究開発実施前の出願「遮音・吸音構造体及び遮音・吸音装置」(特願 2003-151871)を基礎出願とし、国内優先権主張により本研究により得られた測定結果を新たに加え、「遮音・吸音構造体, 遮音・吸音装置並びにこれらを適用した構造物及びこれを構成する部材」を PCT 国際出願 (第 PCT/JP2004/00763 号) した。

- ・ 成果の普及・実用化に向けた体制整備等

制度終了後も低周波音の遮断を目的として研究を進めている。

複数の企業に対して技術を公開し、技術的アドバイスを行っている。

- ・ その他の取り組みについて

本年度の国際学会 Inter-noise2005 に発表を行う。

## 自己評価結果

### 総合評価

【評価】 a

【コメント】 圧電高分子を用いる遮音パネルを研究課題としたが、研究の途中で圧電高分子を用いず、汎用の高分子である PET の湾曲板を用いることにより、軽量廉価で低周波に有効な遮音パネルを作成することに成功した。圧電高分子のパネルは透過損失の任意制御の行える用途に役立つことを示した。

・その他に、本制度に対する意見、提案等について

【コメント】 本研究の場合、基礎研究、開発研究、製品化研究を連続して包含しているため、時間的制約が大きな問題であった。特に開発研究の段階では失敗と成功の積み重ねが必要であり、この段階的進歩を行う時間的余裕がなかった。

本研究の反省としては、A4 パネルの機械的構成の改良、選択に十分な時間が取れなかったことがある。また圧電高分子パネルでは、フィードバック回路の位相の調整を多数のパネルで一致させることが至難であったため、大型パネルでのフィードバックによる透過損失増加の実験には失敗した。製品化研究をいきなり行ったための失敗であり、窓程度の面積で、パネルの数が少数であれば、成功したものと考えられる。

PET パネルの改良については、研究を継続中であるが、低周波遮音として実際に役に立つために、企業が製品化研究として取り上げることを希望している。

### I. 目標達成度について

【評価】 b

【コメント】 PVDF A4 パネルの機械的構成の最適化およびフィードバック回路の安定化についてはまだ十分に目的を達成したとはいえない。電気回路を用いない PET の A4 パネルおよび大型パネルについてはほぼ目的を達成した。しかし PET 板の形状の最適化などによりなおいっそうの改善の余地が残されている。

## II. 研究開発計画について

【評価】 a

【コメント】当初の研究開発計画は妥当であった。試料の入手、パネルの作成は順調に進み、大型枠のシミュレーション計算による設計製作も成功した。音響測定は ISO の規格に沿って信頼できる結果を得た。しかし、この研究は「ものづくり」研究の範疇に入るものであり、研究の進展に応じて、フレキシブルな対応が必要であった。多数のパネルの電気回路を同等に調整することの困難のため、電気回路の必要の無い PET 板のパネルを工夫して完成させたのはその例である。

## III. 研究成果について

### (1) 社会性

【評価】 a

【コメント】騒音対策は環境問題の重要な課題である。特に低周波騒音には十分な対応策がなく大きな関心がよせられている。湾曲プラスチックパネルは低周波音に有効であり、軽量廉価である。

まずは従来の遮音材料と組み合わせて用いることにより、遮音性の改善と経済性向上に役立つと期待される。

### (2) 技術革新性

【評価】 a

【コメント】多くの遮音材料は高周波音で質量則に従う遮音を行ってきた。低周波音での弾性則による遮音は板状の形のためにあまり有効に働かなかった。本研究で提案した湾曲状プラスチック板による遮音パネルでは、音の圧力によって湾曲面内の伸縮振動を生じるため、音のエネルギーがプラスチック板の弾性エネルギーに有効に転換される。その結果低周波数帯域での遮音性能が向上するのである。

PVDF パネルは圧電性のために電気回路によってその弾性率を任意に制御できるという特異な性質をもつ。音の入射によって弾性率が増えれば遮音性が向上する。したがって 40 ミクロンという薄いフィルムで 1 ミリ厚の鉄板に相当する遮音効果を生ずる。この特殊な効果は、防音壁のような大面積のものではなく、窓程度の面積での音透過の制御やヘッドセットの防音など異なる分野での応用に有効である。本研究によって基本的な技術は確立できたので、企業での現実の問題に対処することで今後発展すると考える。

課 題 名：鋼構造物の損傷度診断のための高精度超音波技術の開発  
 研究代表者：廣瀬 壮一（東京工業大学）

## 研究目標の概要・成果の概要

### 【研究目標の概要】

鋼橋をはじめとして多くの鋼構造物の溶接部に疲労損傷が発生しており、溶接部内部の欠陥を効率的に高精度で診断するための探傷技術を開発することは喫急の課題である。そこで、本研究では、損傷箇所や欠陥形状を画面上で三次元表示できるような超音波探傷器の開発を目標としている。これによって、鋼構造物内の欠陥探傷精度が格段に向上すると考えられ、これまでのような検査技術者の主観的判断によらない客観的な構造物の診断が可能となる。

本研究の核となる技術はアレイ超音波探傷である。その内容は(1)超音波要素技術の高精度化に関する研究、(2)高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発、(3)高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発の3項目からなる。

(1) 超音波要素技術の高精度化に関する研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超音波ビームの数値シミュレーション</li> <li>・アレイ探触子の選定方針、設計条件の提案</li> <li>・シミュレーション波形を用いた開口合成と逆散乱解析</li> </ul>
(2) 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人工きず試験体を用いたアレイ超音波探傷基礎実験</li> <li>・実験データを用いた開口合成によるアレイデータの可視化</li> <li>・開口角の考え方を援用したデータ高速処理方法の検討</li> </ul>
(3) 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・鋼製橋脚隅角部モデル試験体を用いたアレイ探傷法による溶接未溶着部分の画像化</li> </ul>

### 【研究成果の概要】

上記の(1)-(3)の研究項目ごとに得られた成果の概要を述べる。

#### (1) 超音波要素技術の高精度化に関する研究

まず、超音波を発するアレイ探触子を図 1(a)のように位相差をつけて励起される波源群としてモデル化し、図 1(b)に示すような超音波ビームの放射パターンを数値的にシミュレーションした。振動子の数や大きさ、配置間隔など探触子の設計変数を変化させて数値計

算を行い、最適な振動子の設計条件を明らかにした。また、鋼材中の超音波は指向性を持っており、最適なアレイ探触子を用いても入射角が  $60^\circ$  を越える方向には期待通りの放射パターンが得られないことを示した。この特性は固体中の超音波に特有のものであり、医療分野などの無指向性の音響波には見られない性質である。

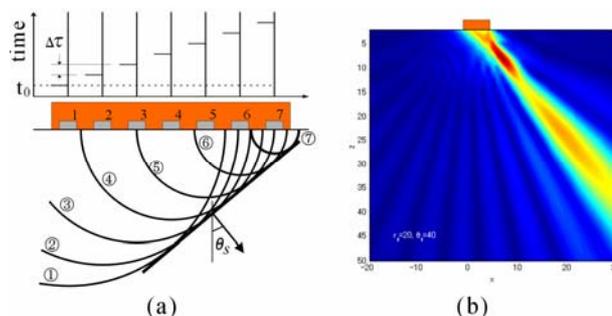


図 1 (a)アレイ超音波探触子の数値モデルと(b)数値シミュレーションによって得られた放射パターン例(入射方向を鉛直下方から右  $40^\circ$  に設定したもの)。

次に、面外 SH 波を用いたアレイ超音波探傷試験の数値シミュレーションを行い、その結果を入力として開口合成法及び逆散乱解析による欠陥の形状の画像化を行った。欠陥の種類、探触子の位置、振動子の間隔などを変化させて解析を行い、それらの条件が欠陥形状の再構成画像に与える影響を調べた。その結果、精度のよい画像を得るためには、鋼板内の多重反射を利用するなど開口角を広くすることが最も重要であるという結論を得た。また、開口合成法と逆散乱解析法の結果を比較すると、開口合成法では入射波の波形がそのまま再構成画像に反映されて不鮮明な結果しか得られないのに対し、逆散乱解析法は、波動理論に基づいて波形処理を行うため、より明瞭な画像が得られ、高精度な超音波探傷が可能であることがわかった。一例を図 2 に示す。図(a)に示すような横穴を持つ鋼材に対してアレイ超音波実験を行い、得られた波形を用いて円形の横穴の断面形状の再現を試みた。図(b)の開口合成法では横穴の境界付近で画像がさざなみ状になっているのに対し、図(c)の逆散乱解析では横穴の境界部分にのみ指示が出ていることがわかる。

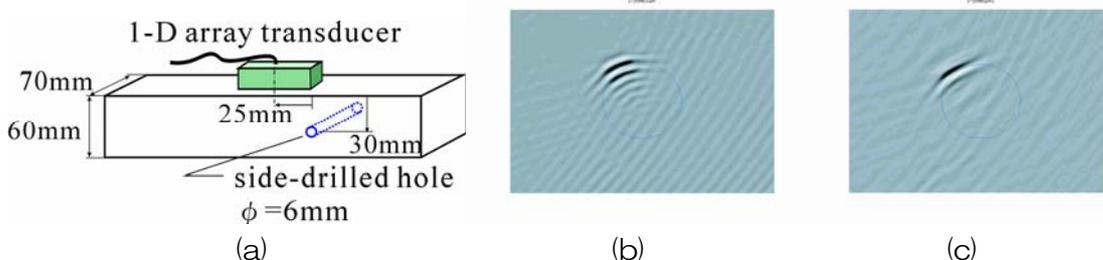


図 2 (a)円形横穴に対するアレイ超音波実験。(b)開口合成法と (c) 逆散乱解析(Kirchhoff 解析)によって再構成された円形横穴の断面画像。青い円は横穴の境界を表す。

(2) 高精度超音波探傷システムの構築に関する研究開発

1次元リニアアレイ探触子と2次元マトリックスアレイ探触子を試作し、いくつかの人工欠陥を有する供試体を用いて欠陥形状の可視化とデータの高速処理を試みた。1次元リニアアレイは64個の振動子を一列に並べたもので、2次元マトリックスアレイは $16 \times 16$ の合計256個の振動子を格子状に並べたものである。可視化においては開口合成法を用いた。アレイ探触子と欠陥の相対的な位置を様々に変化させて欠陥形状の再現性を検討した結果、2次元アレイの場合には、いずれの探傷条件においても入射波が反射する面を十分な精度で再現できることが分かった。一方、1次元アレイの場合には、探触子と欠陥の相対的な位置関係によって探傷精度が低下する可能性があること、また、三次元的な形状をもつ物体の再現のためには1次元アレイ探触子を機械的に掃引する必要があるが、その際に得られる画像は掃引方向に歪むことがわかった。図3右図はその一例である。左図のように厚板鋼板の底面に空けた平底穴に対して1次元アレイ探触子をy方向に掃引して得た平面画像である。平底穴は真上から見ると円形断面を持っているにも関わらず、掃引方向に伸びた画像が得られている。一方、2次元アレイの場合には、図4のように平底穴の3次元形状が正確に再現されている。

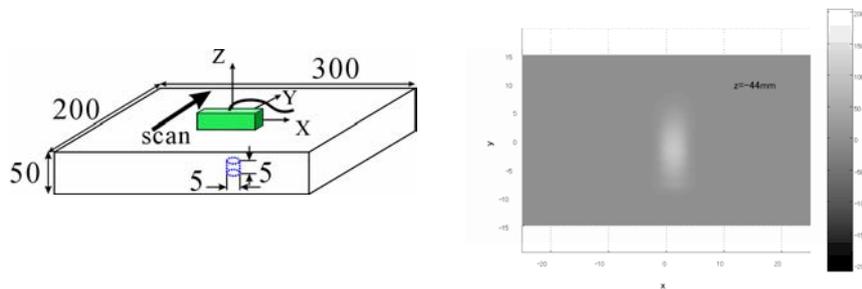


図3 1次元アレイ探触子を用いた平底穴の探傷模式図(左図)と得られた平面画像(右図)

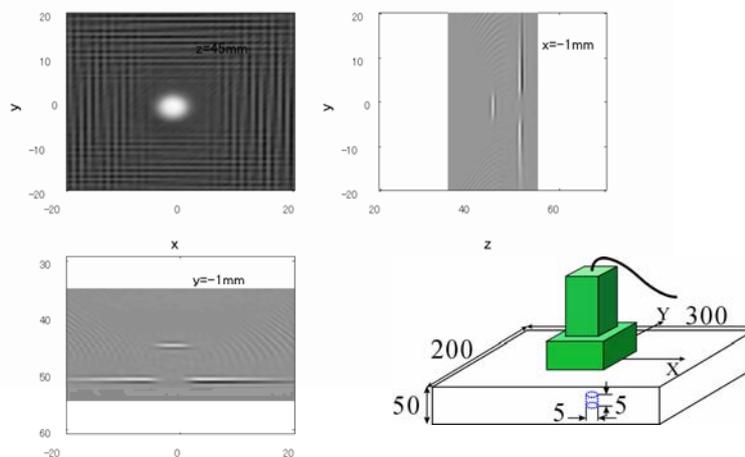


図4 2次元アレイ探触子を用いた平底穴の探傷模式図(右下図)と得られた断面画像

一般に欠陥形状の画像化は超音波が当たる反射面に対してなされる。したがって、超音波を探傷面に対して垂直に入射する垂直探傷のみならず、様々な角度から超音波を入射させればより詳細な欠陥形状を再現できる。本研究では垂直探傷に加え、探触子を斜めウェッジにのせて超音波を斜めに入射する斜角探傷や鋼板裏面における反射波を利用した探傷などいくつかの探傷法の組み合わせによって、垂直探傷のみでは得られない欠陥側面の形状も再現できることを確認した。

アレイ超音波探傷では膨大な量の波形データが取得される。例えば、 $16 \times 16$  の 256 個の探触子を持つ 2 次元マトリクスアレイの場合、最大  $256 \times 256 = 65536$  個の波形を高速に処理する必要がある。本研究では、欠陥から見たときこれらの波形データのいくつかが類似の開口角を持ち、重複したデータとなっていることを考慮して、必要なデータのみを選び出して効率的に欠陥形状の再構成を行う方法を提案した。これにより、欠陥の再構成精度は若干低下するものの、データ処理時間を  $1/10 \sim 1/20$  程度に短縮できることを確認した。

### (3) 高精度超音波技術の鋼構造物への応用に関する研究開発

鋼橋には様々な板組みがあるが、本研究では実橋において最も数多い板組である角柱 WW タイプ(溶接線が柱ウェブには現れないタイプ)をプロトタイプとしてアレイ超音波探傷の適用性を検討した。WW タイプでは柱ウェブから溶接部の垂直探傷が可能である。図 5 の左図に示すように、実際に溶接によって製作した疲労試験体の隅角部に対して、1 次元や 2 次元アレイ探触子をウェブ面に垂直にあてて溶接未溶着部の推定を行った。図 5 の右図における十字の領域をグレースケールで描いた画像が 2 次元アレイによる結果であり、その右下の赤く縁取りした画像が十字部の一部を 1 次元アレイの掃引することによって得た結果である。白い部分が未溶着部であるが、1 次元アレイと 2 次元アレイの各々で得られた画像には整合性があり、アレイ探傷によって溶接未溶着部の形状推定が可能であることが示された。

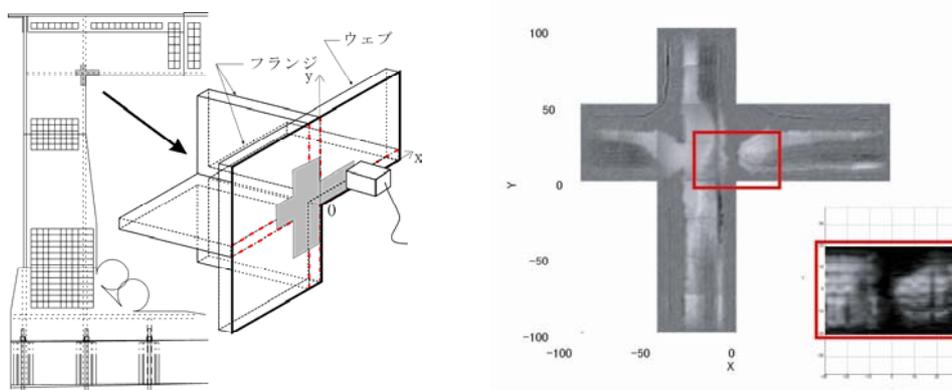


図 5 鋼橋疲労試験体の隅角部に対するアレイ探傷(左図)とアレイ超音波探傷によって得られた溶接未溶着部の画像(2次元アレイ:右図の十字の画像、1次元アレイ:右図の赤線で囲まれた画像)

以上の研究成果を踏まえ、今後はアレイ超音波探傷法をさらに改良するとともに、図 6 の左図のように 1 次元と 2 次元アレイを始めとするさまざまな探傷法を組み合わせたシステムを構築して、超音波探傷器の精度向上を行っていく必要がある。また、本研究ではアレイ超音波探傷の鋼橋への応用として、WW タイプの角柱隅角部を扱うに留まったが、実際の鋼橋には図 6 の右図に示すように様々な板組の角柱があり、また、円柱橋脚やリブ補強といった他の構造形式においても疲労き裂が発生している。今後、それらの構造部位に対してもアレイ超音波探傷の適用性を広げて実用化に結びつける必要がある。

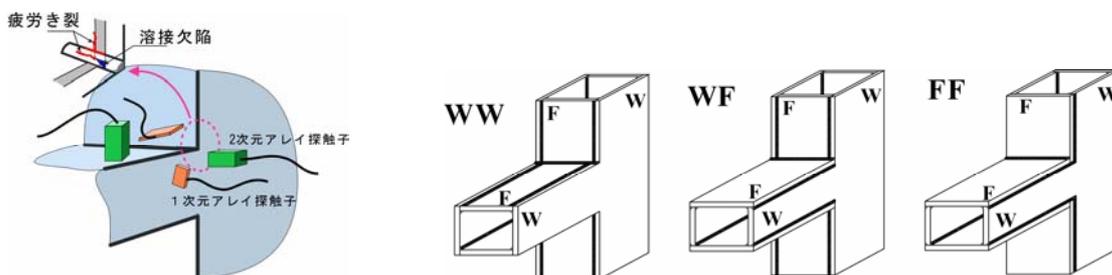


図 6 今後の課題 (左図：様々な探傷法の組み合わせ、右図：異なるタイプの橋梁への適用)

## 研究成果公表等の状況

### 【研究成果発表等】

	原著論文による発表	左記以外の紙上発表	口頭発表	合 計
国 内	3(2) 件	0 件	4(1) 件	7(3) 件
国 外	1(1) 件	0 件	1 件	2(1) 件
合 計	4(3) 件	0 件	5(1) 件	9(4) 件

(注：既発表論文について記載し、投稿中の論文については括弧書きで記載のこと)

### 【主要雑誌への研究成果発表】

雑 誌 名	時 期	出版社
応用力学論文集 Vol.6, pp.1089-1096; 入射場の放射パターンを用いるリニアアレイ探触子の設計変数決定法	平成 15 年 8 月	土木学会
土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集 CDROM:477-478;アレイ探触子の最適化に関する研究	平成 15 年 9 月	土木学会
Proc. First International Conference on Urban Earthquake Engineering, pp.455-462; Development of planar array probes for detection of three-dimensional defect	平成 16 年 3 月	Tokyo Tech CUEE
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Vol.23, Fast imaging of 3-D flaw using linearized inverse scattering methods	平成 16 年 6 月	AIP
応用力学論文集 Vol.7, 定量的超音波非破壊評価とその周辺技術	平成 16 年 8 月	土木学会
応用力学論文集 Vol.7, 数値シミュレーションを用いた開口合成法の欠陥形状再構成能に関する研究	平成 16 年 8 月	土木学会
土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 I, CDROM:1209-1210, SH 波のアレイ探傷データを用いた欠陥画像の再構成に関する研究	平成 16 年 9 月	土木学会

土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集 I, CDROM-I:257-258, 1次元および2次元アレイ探傷データを用いた開口合成法による鋼材中模擬欠陥の画像化	平成 16 年 9 月	土木学会
Bridge Maintenance Safety, Management and Cost, CDROM:S08-13, Ultrasonic wave radiation from a linear phased array transducer	平成 16 年 10 月	A.A. Balkema
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Vol.23, Flaw shape reconstruction from SH-wave array ultrasonic data using time domain linearized inverse scattering method	掲載決定	AIP
Journal of Structural Eng./Earthquake Eng., Development of 3D flaw detection system with multi-channel planar array probes and 3D SAFT algorithms	掲載決定	土木学会
Journal of Structural Eng./Earthquake Eng., A 3D linearized inverse scattering method for scatterers in a two layered medium	掲載決定	土木学会
日本非破壊検査協会平成 16 年春季大会講演概要集, リニアアレイ探触子を用いた表面疲労き裂端部の検出	掲載予定	日本非破壊検査協会

### 【その他】

(独)土木研究所が中心となって行っている「鋼製橋脚隅角部の非破壊検査法に関する共同研究」に関連して 2004 年春に実施された第一回「隅角部を対象とした各種超音波探傷法の性能確認試験」に参加した。ただし、実務的な作業に慣れていないことから必ずしも十分な成果を出すことはできなかった。この点を反省し、2005 年春に行われる第二回の性能確認試験にも参加する予定である。

## 自己評価結果

### 総合評価

【評価】 b

【コメント】以下に述べるように、探触子の製作に時間を要したため全体的に研究の実施が遅れたが、平成 15 年度における目標は十分に達成し、期待される研究成果を得ることができた。当初予定していた 2 年計画の研究の 2 年目については実施することができなかったが、超音波アレイ探傷の基礎から応用までを総合的に行った研究として優れた研究であると自己評価する。

・その他に、本制度に対する意見、提案等について

【コメント】4月に研究応募、6月にヒアリング、採択決定というスケジュールとなっており、実際に研究を開始するのは7月になってからである。本研究ではアレイ超音波の基礎的な検討に始まり、探触子の製作と応用を行う上では実質的な研究期間があまりにも短かった。採択決定までの選考プロセスをできるだけ前倒して実施するように要望します。

### I. 目標達成度について

【評価】 a

【コメント】人工欠陥あるいは WW 型角柱鋼製橋脚の未溶着部に対してアレイ超音波を用いた 3 次元欠陥形状の画像化に成功した。このように、当初の予定通り、超音波アレイ探傷のプロトタイプを開発することができ、平成 15 年度の研究目標は十分に達成できた。ただし、実際の鋼橋には様々な構造形式があり、アレイ超音波探傷の実用化にはさらなる検討が必要である。

### II. 研究開発計画について

【評価】 b

【コメント】アレイ探触子の製作に時間を要したため、全体の研究の実施が遅れた。ただし、平成 16 年度も研究を継続して行い、結果的にはほぼ当初計画通りの研究目標を達成することができた。研究経費については、東芝製超音波探傷装置ならびにそれに関連する設備整備費が当初予定額を若干超えたものの、ほぼ当初の計画に従って補助金を使用しており、経費に関する計画は適切であった。

### Ⅲ. 研究成果について

#### (1) 社会性

【評価】 a

【コメント】本研究では鋼材内部の欠陥形状を画像として得た。このような画像データが実構造物について蓄積されれば、適切な鋼構造物の維持管理が可能となり、ひいては国民の安全確保と社会資本のライフサイクルコストの削減に大きく寄与すると考えられる。

#### (2) 技術革新性

【評価】 a

【コメント】本研究で用いたアレイ超音波探傷では、欠陥の探傷精度の向上、機械的な操作の大幅な低減による作業効率の向上、欠陥形状が画像として記録されることによる検査結果の客観性の確保が達成された。これらの点はいずれも従来の手探傷による超音波法にはない特徴で、アレイ超音波探傷は鋼橋の維持管理に有用な新技術となるものである。