

平成22年 4月 6日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19360045  
 研究課題名（和文）ラム波伝播解析に基づく複合材構造の高精度ヘルスマモニタリングの研究  
 研究課題名（英文）Research on highly accurate structural health monitoring based on the Lamb wave propagation analysis for composites structures  
 研究代表者  
 千葉大学・大学院工学研究科・教授 胡 寧 (HU NING)  
 研究者番号：60250685

研究成果の概要（和文）：本研究では、運用中の航空機・高速車輛を対象に、センサとアクチュエータを組み込んだ知的金属と積層複合材構造について、高精度ラム波伝播数値解析法と信号処理法を確立するとともに、ラム波と各種の損傷との相互作用を詳細に調査し、損傷で生じた反射波と透過波の発生メカニズムや反射波と透過波の特徴を調べることにより、金属や複合材構造の損傷位置の同定精度と信頼性を向上するとともに、損傷範囲を定量的に評価する手法を確立した。

研究成果の概要（英文）：In this research, for smart metallic and composite structures with sensor and actuator network in operating aircrafts and high speed vehicles, a highly accurate numerical simulation method of Lamb wave propagation and a signal processing method have been developed. Based on detailed investigations of interactions between Lamb wave and various damages, the mechanism of reflected and transmitted waves, and the characteristics of these reflected and transmitted waves have been studied. Then, the identification accuracy and reliability of damage location in metallic and composite structures has been improved, moreover, quantitative evaluation methods of damage size have been built up.

交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計         |
|--------|-----------|-----------|------------|
| 2007年度 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000  |
| 2008年度 | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000  |
| 2009年度 | 1,900,000 | 570,000   | 2,470,000  |
| 年度     |           |           |            |
| 年度     |           |           |            |
| 総計     | 9,100,000 | 2,730,000 | 11,830,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：損傷力学 ヘルスマモニタリング ラム波 逆問題解析 波伝播解析

## 1. 研究開始当初の背景

将来の高速車輛や航空機における複合材構造の安全性と信頼性の一層の向上を図るためには、構造物内部の損傷を非破壊的・自動的・実時間的かつ定量的に検出する損傷モニタリングが重要となる。現在、世界中の研究機関において、光ファイバや圧電センサを

用いた構造ヘルスマモニタリング法の研究が活発に進められている。このうち、本研究で対象とする圧電アクチュエータ・センサを用いたアクティブセンシングによる複合材構造ヘルスマモニタリングについては、世界的に研究が開始された段階にあり、実験データはかなり公表されているが、様々な損傷とラム

波との相互作用および散乱波（反射波と透過波）の特徴が不明であり，さらに，**基礎となる波伝播の高精度解析法・波動解析法・信号処理法**はまだ未確立である。

## 2. 研究の目的

将来の高速車輻や航空機における構造の信頼性・安全性の一層の向上を図るためには，疲労や異物衝突による損傷を非破壊的・自動的かつ実時間で検出する構造ヘルスマニタリングが重要となる。本研究は，次世代高速車輻や航空機の安全な運行に不可欠な技術として，**複合材構造の健全性を運行中に定量評価するラム波による高精度構造ヘルスマニタリング技術の開発**を目的とする。そのため，本研究の内容では，高精度ラム波伝播解析法と信号処理法を確立するとともに，複合材構造の損傷位置，損傷範囲と損傷形態を定量的に評価する手法を確立することにより，複合材構造物の健全性の向上を図ることを研究目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では，**高精度ラム波伝播解析法と信号処理法を確立し，この解析法に基づく複合材構造の高精度ヘルスマニタリング技術を開発する**。その主要な研究項目は以下の通りである。

### (1) 高精度ラム波伝播解析

高精度・高効率の波伝播解析法を開発し，さらに，開発した解法を用いて，損傷を有する金属板，CFRP 積層はりや板についてラム波の高精度伝播特性解析を行う。

### (2) ウェーブレット解析による信号処理法

アクティブセンシングにおけるアクチュエータ入力とセンサ出力より，ウェーブレット解析を用いて時間一周波数領域におけるラム波伝播特性を明らかにする。

### (3) 実験データと数値計算データの融合技

信号処理により抽出したラム波特徴を利用して，実験データと数値計算データとの比較より，逆問題解析に基づき，複合材構造の自動的かつ実時間での損傷位置・損傷範囲と損傷形態の定量的評価技術を開発する。

## 4. 研究成果

本研究では，運用中の航空機・高速車輻等の複合材構造物を対象に，センサとアクチュエータを組み込んだ知的金属と積層複合材構造について，高精度ラム波伝播数値解析法と信号処理法を確立するとともに，ラム波と各種の損傷との相互作用を詳細に調査し，損傷で生じた反射波と透過波の発生メカニズムや反射波と透過波の特徴を調べることで，金属や複合材構造の損傷位置の同定精度と信頼性を向上するとともに，損傷範囲と損傷形態を定量的に評価する手法を確立することを目的とする。そのため，次の七つ面を検証した。

(1) 高効率・高精度の波伝播数値解析手法の

確立と実験による検証

(2) 損傷を有する金属板におけるラム波の伝播解析および損傷で生じた反射波の特徴についての研究

(3) 損傷サイズを評価する手法の提案と実験検証

(4) はく離を有する CFRP 複合材におけるラムの伝播解析および最大反射波の発生のための加振周波数

(5) 金属板における損傷の高精度位置同定の技術

(6) CFRP 複合材におけるはく離損傷の高精度位置同定の技術と逆問題解析によるはく離サイズの推定

(7) ラム波による損傷画像の再構築技術の開発

具体的に，上記で示す7つの項目に，下記のような優れた成果を得た。

(1) ラム波が損傷を有する構造に伝播する様子と特徴，また，様々な損傷とラム波との相互作用および散乱波（反射波と透過波）の特徴を調べるために，高精度かつ高効率なラム波伝播解析手法が必要となる。

上記の目的で，任意の損傷を有する板構造を対象とするラム波の伝播解析を行うために，Chebyshev 多項式を用いて，一つ高効率・高精度の擬似スペクトル Mindlin 板要素を構築した。この要素の特徴としては，任意な複雑な損傷に対応することができる。また，剛性と質量マトリクスを作るとき，Chebyshev-Gauss-Lobatto 積分法を用いるため，対角線の質量マトリクスを作ることができ，ラム波伝播解析のような動的の問題において，簡便かつ計算効率高い陽的な時間積分法が適用できる。さらに，高周波の動的の問題においては，提案された要素が高い計算精度を保ちながら，通常の板要素より数十倍低い計算コストに優れている。本研究では，図1に示すように，パルスレーザー加振によるラム波を激励し，レーザー走査および固定したセンサの受信によるラム波伝播の画像化技術を開発した。図2のように，円孔を有するアルミニウム板を対象に，開発したラム波伝播の画像化技術を用いて，提案された数値解析法の有効性を検証した。また，はく離を有する CFRP 複合材において，PZT センサとアクチュエータを貼り付けることによる実験データにより，提案された数値解析法の有効性を検証した。

(2) 開発されたラム波伝播の数値解析手法を

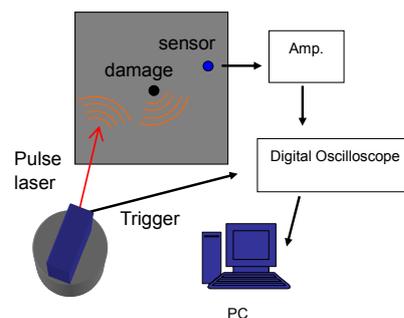
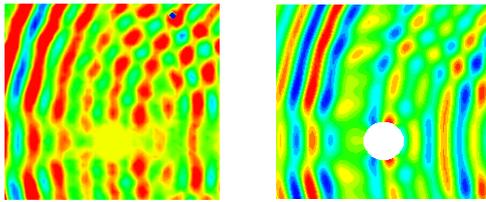


図1. 実験装置概要



(a) レーザー超音波実験 (b) 数値解析  
 図 2.  $t=71.35 \mu s$  における損傷まわりのラム波伝播画像

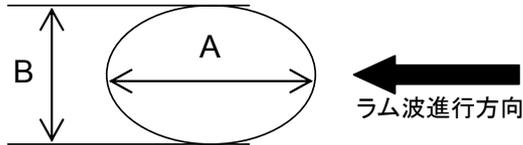


図 3. 損傷形状

用いて、図 3 で示すような楕円状損傷を有する金属板を対象とし、損傷形状、加振周波数および信号のサイクル数などによる反射波の特徴の変化を詳細に解析した。

特に、実際の構造ヘルスマモニタリングシステムの開発には、損傷からの大きな反射波あるいは小さい透過波が望ましいので、損傷からの最大な反射波について、詳しい解析を行った。その結論として、下記の数点に挙げられる。

(a) サイクル数が 3 の場合が高サイクル数に比べて反射波の強さが小さくなっている。これは、サイクル数が小さいほどエネルギーが分散し易くなるためと考えられる。サイクル数 5, 7, 9 の場合にはほとんど違いが見られないが、サイクル数が増えると波が重なりやすくなるため、入力波と損傷からの反射波や境界からの反射波が干渉し、反射波を検出しにくくなる可能性が高くなる。よって、サイクル数は 5 であることが最適なものと考えられる。その後の研究には、全部 5 とした。

(b) 円孔やき裂などの任意の損傷に対して、最大な反射波（反射波振幅／入射波振幅で反射波の強さを評価する）を得るため、特定の最適加振周波数があることがわかり、また損傷形状によってもその値が異なることがわかった。さらに、周波数の増加と伴って、ラム波の波長が減少するが、しかし、最適加振周波数よりも高い周波数帯では損傷からの反射波の強さが減少しているため、必ずしも短い波長における損傷からの反射波の強さが高いとは言えないことが分かる。

(c) 図 4 に示すような入射角度に関して、角度が大きくなるにつれ、周波数に対する反射波強さの感度が小さくなっていることがわかる。さらに、どの角度においても最適加振周波数が存在していることや複数の最適加振周波数が存在している可能性が示唆される結果となっている。後ろ CFRP における最適加振周波数の研究における結論と総合して、上記のような最適加振周波数の存在は、

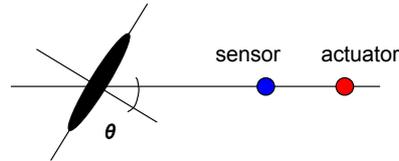


図 4. ラム波の進行方向と亀裂のなす角の定義

損傷周辺の領域の共振現象によるものであると考えられる。上記で得られた結果と情報がセンサとアクチュエータの配置や信号の設計などに対して大きな貢献と考えられる。

(3) (2) で得られた情報のもとに、図 5 に示すようなはく離や穴のような楕円状損傷を仮定し、反射波強さの理論的な評価法を利用することにより、損傷サイズを評価する新たな理論手法を提案した。また、楕円状損傷に対して、反射波の強さを評価し、図 6 のように、数値解析との比較により、提案した理論手法の有効性を検証した。さらに、図 7 に示すような 4 つの PZT 素子に囲まれた円孔や楕円状穴などの損傷に対して、図 8 に示すような高精度な位置同定ができた以外に、損傷サイズの同定精度が 30% 以内に収まった。

(4) 図 9 に示すようなはく離を有するクロスプライ CFRP 複合材において、詳細な数値解析を行い、はく離で最大反射波の発生のための加振周波数を検討することにより、はく離部の共振現象による最大反射波の発生メカニズムを明らかにした。

つまり、例えば、 $[0/90//90/0]$  における長さ 20mm のはく離が 90 度の間に存在した場合、図 10 に示すように、10kHz~125kHz の周波数帯域に、はく離からの強い反射波を得るために、3 つの最適加振が存在している。

この場合でのはく離部の固有振動解析を

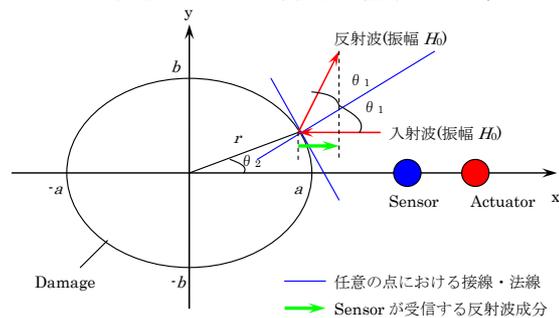


図 5. 損傷が楕円形である場合の反射波

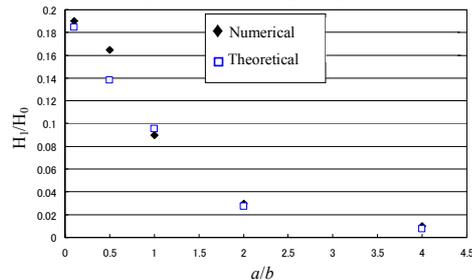


図 6. 数値解析結果と理論値の比較

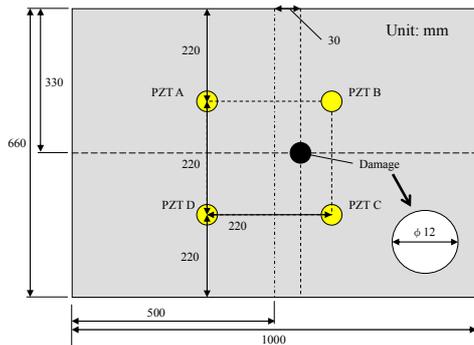


図 7. 円孔の場合 (あるいは楕円状穴の場合)

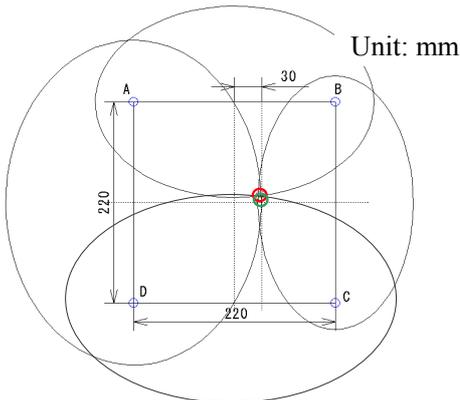


図 8. 円孔の場合の損傷位置同定 (赤: 実際, 緑: 同定)

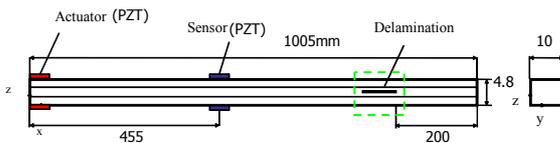


図 9. CFRP はりモデル

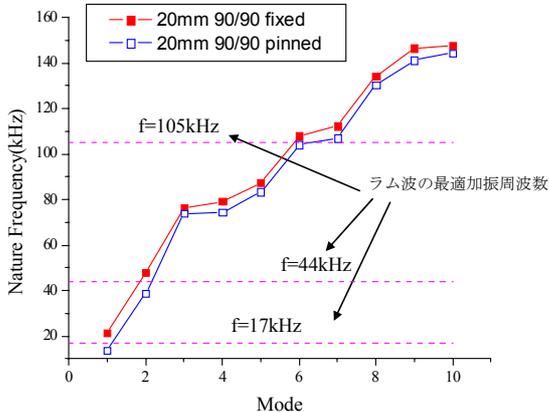


図 10. [0/90/90/0]におけるはく離 20mm 最適加振周波数 17,44,105kHz の場合

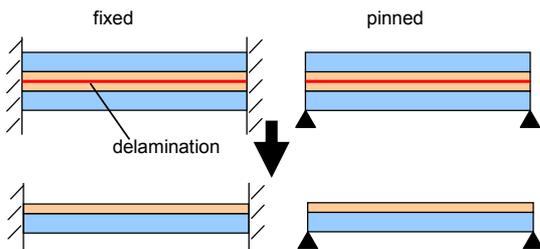


図 11. [0/90/90/0]におけるはく離部の振動解析モデル

図 11 に示すように行い (半分のモデル, 二つの境界条件), 各固有振動数を図 10 に示される. 図 10 から, 最適加振周波数がはく離部における二種類の境界条件のモデルから得た固有振動数と一致していることが分かる. つまり, 17kHz がはく離部の第一次固有振動数, 44kHz が第二次固有振動数, と 105kHz が第七次固有振動数と一致している. また, 今回は  $A_0$  波を用いるため, 第一, 二と七次固有振動数と対応する振動モードが  $A_0$  波の変形モードと一致していることが分かる.

(5) 損傷を有する金属のはりと板において, PZT による  $A_0$  ラム波モードの加振技術を開発し, 高精度な損傷位置同定を行った.

詳細について, アルミニウム板の損傷検出実験に用いる圧電素子の配置を図 12 に示す. アクチュエータを中心に同半径上に  $120^\circ$  間隔で三つのセンサを配置する. その後, ウェーブレット解析を用いて時間一周波数領域におけるラム波伝播特性を明らかにし, 損傷から三つのセンサまでの反射波の到着時間を計測し, 波の伝播速度の情報を用いて, 伝播距離を得る. 最後に, 得た距離の情報に基づいて, センサ A, B, C それぞれを中心とした円を描きそれぞれの円の交点で囲まれた部分を損傷位置とする. 穴の場合について, 図 13 に示すように, センサとアクチュエータを配置し, 同定結果を図 14 に示す. また, き裂の場合についても, 穴よりいい同定精度を得たことを実験で検証した.

(6) はく離を有する CFRP 複合材構造における高精度な損傷位置同定とはく離サイズの評価を行うとともに,  $S_0$  と  $A_0$  ラム波モードによるはく離モニタリング技術の特徴を調べた. さらに, (1) で開発したラム波伝播の数値解析手法を用いて, はく離両端から生じた反射波の特徴を検討し, はく離位置同定の精度を向上する可能性を示した.

詳細的に,  $S_0$  の場合, 図 15 に示すようなクロスプライ CFRP 複合材はりにおいて, アクチュエータとセンサを片面で配置し, はく離ありの信号 とはく離なしの信号との比較

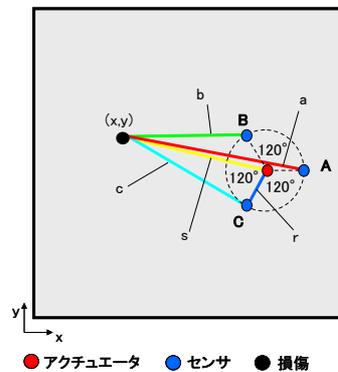
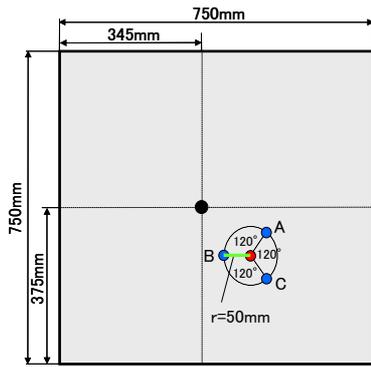


図 12. 圧電素子の配置



- アクチュエータ (φ=10mm t=0.5mm)
- センサ (φ=10mm t=0.5mm)
- 損傷 (φ=20mm)

図 13. 穴の場合

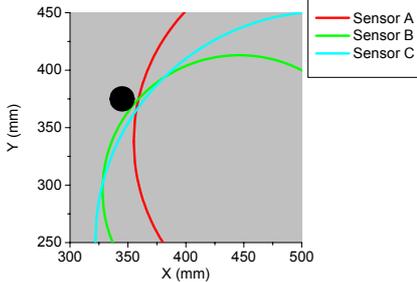


図 14. 穴の同定結果

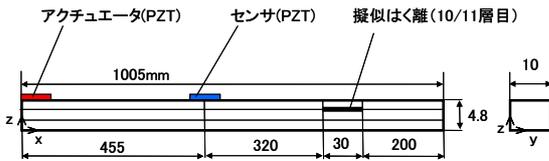


図 15.  $S_0$ 波の場合 (0/90/90/0 の場合)

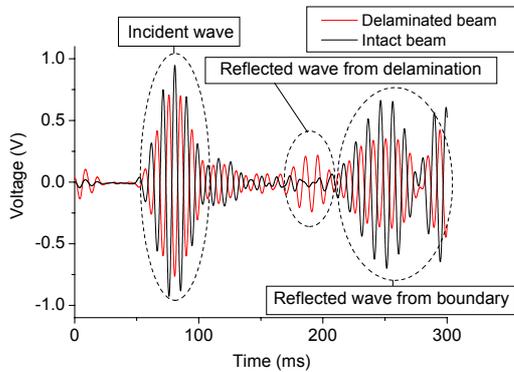


図 16. はく離ありとはく離なしとの比較

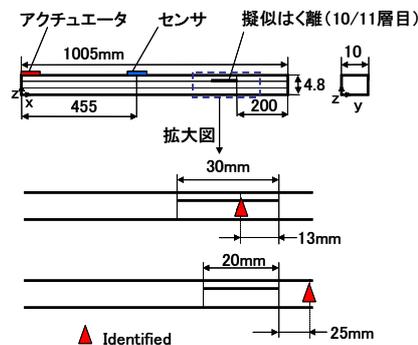


図 17. はく離位置の同定結果

は図 16 に示される. この図から, はく離からの反射波は一目了然になっている. さらに,  $S_0$  波の伝播速度と反射波の到達時間を用いて, 推定したはく離の位置を図 17 に示す.

また, ここまでは,  $S_0$  モードを用いるとき, 数値解析および実験データの融合により, 反射波の強さからはく離の長さを推定することが可能であることを検証し, 推定したはく離の長さの誤差が全て 10% 以内に入ることが分かる.

しかし,  $S_0$  モードの場合には, 小さいはく離や積層中央に存在しているはく離に対して, 検知不可能であるので, 本研究では,  $A_0$  モードを用いて, はく離の同定も行った.

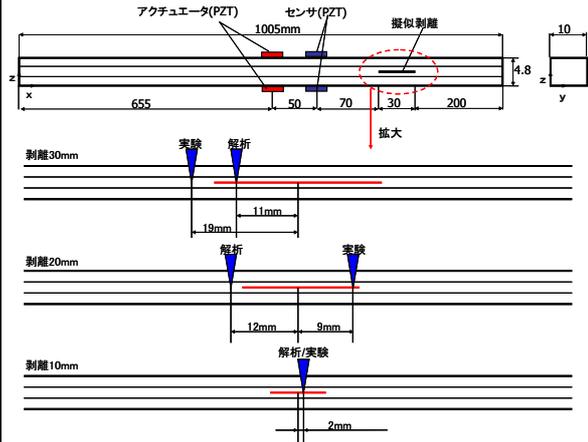
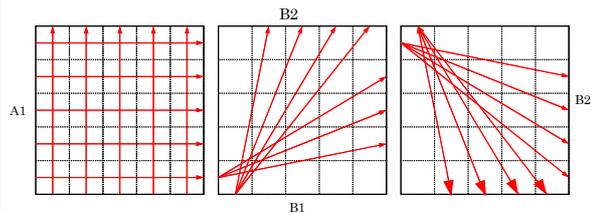


図 18. [0/90/90/0] の同定結果

図 18 に一つの例を示すように, 結論として,  $S_0$  波によって検出不可能な全てのはく離は  $A_0$  波により検出が可能であることが分かった. また, 反射波が短い時間で重なりと振幅が大きくなるため,  $A_0$  波による位置同定は 10mm 以下の小さなはく離に対して特に有効である.

(7) 図 19 に示すように, センサとアクチュエータが検査領域の境界だけで走査し, 損傷を通過したときラム波の振幅の減少により, 図 20 に示すような一つ高効率化の損傷画像の再構築技術を開発した. ラム波の長距離伝播や境界だけでの走査などの特徴により, この技術が広範囲検査できるだけでなく, 走査回数も非常に少ないという利点がある.

このような技術が, 走査法による非破壊検査技術を進化させることだけでなく, センサ・アクチュエータからなるネットワークによる実時間構造物のヘルスマonitoringによる



(a) 平行な走査 (b) 領域左下から斜めの走査 (c) 領域右上から斜めの走査 (矢印の始点: アクチュエータ, 矢印の終点: センサ)

図 19. 走査パターン

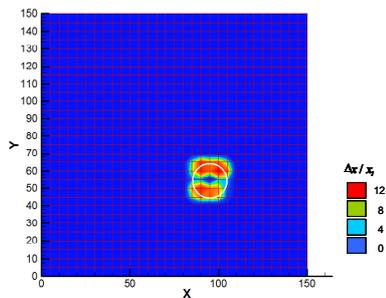


図 2.0. 穴の画像構築 (白い線: 実際の穴)

損傷情報の評価技術にも貢献すると考えられる。

最後に、今後の展望としては、いままで得られた知見により、今後の主要研究課題として、

- (a) 透過波を利用する密なセンサ・アクチュエータネットワークによる損傷領域および損傷画像構築技術の信頼性の向上
  - (b) 疎なセンサ・アクチュエータネットワークを用いるとき、反射波と透過波を同時に使うことによる損傷サイズの評価技術の評価精度の向上
  - (c) 最適加振周波数を含めて、損傷からの最強大反射波あるいは最弱透過波を発生させるための総合的な加振技術の開発
  - (d) 複合材構造における損傷形態の詳細な評価技術の開発と評価精度の向上
- などの課題が挙げられる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

1. Analysis of Wave Propagation in Beams with Transverse and Lateral Cracks using a Weakly Formulated Spectral Method, **Journal of Applied Mechanics (ASME)**, 74 (2007), 119-127. N. Hu, H. Fukunaga, M. Kameyama, D. Roy Mahapatra and S. Gopalakrishnan
2. The partition of unity finite element method for elastic wave propagation in Reissner-Mindlin plates, **INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING**, 70(12) (2007), 1451-1479. N. Hu, H.H. Wang, B. Yan, H. Fukunaga, D. Ray Mahapatra and S. Gopalakrishnan
3. Identification of delamination position in cross-ply laminated composite beams using  $S_0$  Lamb mode, **Composites Science & Technology**, 68 (2008), 1548-1554. Ning Hu, Takahito Shimomukai, Cheng Yan and Hisao Fukunaga
4. Damage Identification of Metallic Structures Using  $A_0$  Mode in Lamb Wave, **Structural Health Monitoring: An International Journal**, 7(2008), 271-285. Ning Hu, Takahito Shimomukai, Zhongqing Su and Hisao Fukunaga
5. 低速衝撃荷重下におけるCFRP擬似等方性板の損傷進展予測, **日本航空宇宙学会誌**, 56(2008), 220-227. 前場豊, 胡寧, 原栄一, 福永久雄
6. A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads, **Mechanics of Materials**, 40 (2008), 920-935. N. Hu, Y. Zemba, T. Okabe, C. Yan, H. Fukunaga and A. M. Elmarakbi

7. 多点荷重を受けるCFRP補強パネルの実験的衝撃荷重同定, **日本複合材料学会誌**, 35 (2009), 106-111. 海埜孝夫, 三浦裕樹, 杉本直, 亀山正樹, 胡寧, 福永久雄

8. A Simplified Damage Model for SHM Metallic and Composite Structures, **Encyclopedia of Structural Health Monitoring**, Chapter 44, hm068-1~shm068-18, N. Hu, D. Roy Mahapatra and S. Gopalakrishnan

9. Construction of a Mindlin pseudospectral plate element and evaluating efficiency of the element, **Finite Elements in Analysis and Design**, 45(2009), 538-546, Y. Liu, N. Hu, C. Yan, X. Peng and B. Yan

10. 衝撃荷重同定によるCFRP積層板の衝撃損傷モニタリング, **日本航空宇宙学会誌**, 57(2009), 29-34. 田島賢典, 三浦裕樹, 杉本直, 亀山正樹, 胡寧, 福永久雄

11. Finite element simulation of delamination growth in composite materials using LS-DYNA, **Composites Science & Technology**, 69(2009) 2383-2391. Ahmed Elmarakbi, Ning Hu and Hisao Fukunaga

12. Optimal Excitation Frequency of Lamb Waves for Delamination Detection in CFRP Laminates, **Journal of Composite Materials** (in press), N. Hu, Y. Liu, Y. Li, X. Peng and B. Yan

13. Identification of delamination position in composite laminated beams using  $A_0$  Lamb mode, **MECHANICS OF ADVANCED MATERIALS AND STRUCTURES** (in press), Ning Hu, Cheng Yan, Kanako Sakai, Luyao Liu and Bo Yan

[雑誌論文] (計 13 件)

[学会発表] (計 3 件)

[図書] (計 1 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.em.eng.chiba-u.jp/~lab2/hu/index.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

胡寧 (HU NING), 千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 60250685

(2) 研究分担者

福永久雄 (FUKUNAGA HISAO), 東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 50134664

岡部朋永 (OKABE TOMONAGA), 東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50344164

亀山正樹 (KAMEYAMA MASAKI), 東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 30302178

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: