

超音波伝播速度の測定による集成材接着はく離の検出 (第3報)* 製品における接着はく離の検出Ⅱ

柳川 靖夫

工場で生産された、接着はく離を含むオウシュウアカマツ4プライ小断面集成材を使用して、超音波伝播速度の測定による接着はく離の非破壊検出について検討を加えた。測定には、発振超音波周波数が70kHzのDoctor Wood ((株) 秋田エスケイケイ) および200kHzのPUNDIT 7 (CNS Farnell Ltd.) を用いた。Doctor Woodでは、超音波の送信子および受信子(センサー)を、接着層を挟んでセンサーを対面に配置する手法(対面測定)、および接着層を含む側面に配置する手法(側面測定)により測定を行った。PUNDIT 7では、対面測定のみを行った。その結果、集成材の主として1側面のみに20mm幅超の接着はく離が存在する場合、いずれの手法および測定機器でも、接着はく離の検出は可能であった。集成材の1側面に、部分的に20mm幅超の接着はく離が存在する場合、測定方法によっては接着はく離の検出は可能であったものの、その検出感度は、全長にわたり接着はく離が存在する場合よりも低かった。接着はく離の幅が20mm未満の場合、いずれの手法または機器を用いても、接着はく離の検出は困難であった。

1. はじめに

合板等の比較的薄い木質材料に発生する接着はく離を、超音波やアコースティック・エミッションを使用して非破壊的に検出する技術が開発されている¹⁻³⁾。著者は、集成材に発生した接着はく離を、超音波伝播速度を測定することにより非破壊的に検出することを試みてきた。第1報⁴⁾では、超音波伝播速度(以下伝播速度とする)を測定することにより、集成材の接着はく離(以下はく離とする)を非破壊的に検出できることを報告した。第2報⁵⁾では、製造現場ではく離が生じた中断面集成材および小断面集成材のはく離の検出を試み、はく離が存在する箇所では伝播速度が低下することを報告した。しかし、製品で発生するはく離の形態は一様ではないため、様々の形態のはく離を含む製品を測定して、検出の可否を調べるのが望ましい。そこで、本報では、製造時にはく離が発生した複数の製品の伝播速度を測定し、様々の形態のはく離における伝播速度の変化を調べた。

2. 材料および方法

2.1 試験体および測定方法

図1に、試験体の形状およびはく離の位置を示す。

集成材工場で製造された同一等級構成オウシュウアカマツ構造用集成材であり、積層数は4プライ、幅およ

び厚さは120mm、長さは3650mm、接着剤には水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤が使用されていた。なお、集成材はすべて通しラミナで構成されていた。No.1~No.5の5試験体を使用し、それぞれのはく離の位置は図1に示すとおりで、すべて厚さ方向の中間接着層にはく離が存在した。例えば、No.1試験体では、左端を0mm、右端を3650mmとし、集成材の接着層を含む側面のうち主たるはく離を含む側面をA面、その反対側面をB面とした場合、A面では0~1770mm、2370~2470mm、および2730~2930mmにはく離が存在し、B面では、1030~1470mmにはく離が存在した。なお、No.2~5の各試験体でも、主たるはく離を含む側面をA面とし、その反対側面をB面とする。また、例えば500mmの測定位置を表す際には、S500と記す。

超音波の伝播時間(以下伝播時間とする)の測定には、(株)秋田エスケイケイ製のDoctor WoodおよびCNS Farnell Ltd.製のPUNDIT 7を使用した。測定条件は表1のとおりで、超音波の送信子および受信子(以下両者を総称する場合はセンサーとする)の位置は、図2のとおりとした。すなわち、センサーを集成材の接着層を挟んで配置した対面測定、およびセンサーを集成材の側面に配置した側面測定である。Doctor Woodでは対面測定および側面測定を行い、PUNDIT 7では対面測定のみを行った。なお、対面測定におけるセンサー端部は、図2に示すとおり集成材の端部と一致させ、側面測定におけるセンサーの端部も側面端部と一致させた。

* 本研究の一部は第65回日本木材学会年次大会(東京 2015)において発表した。

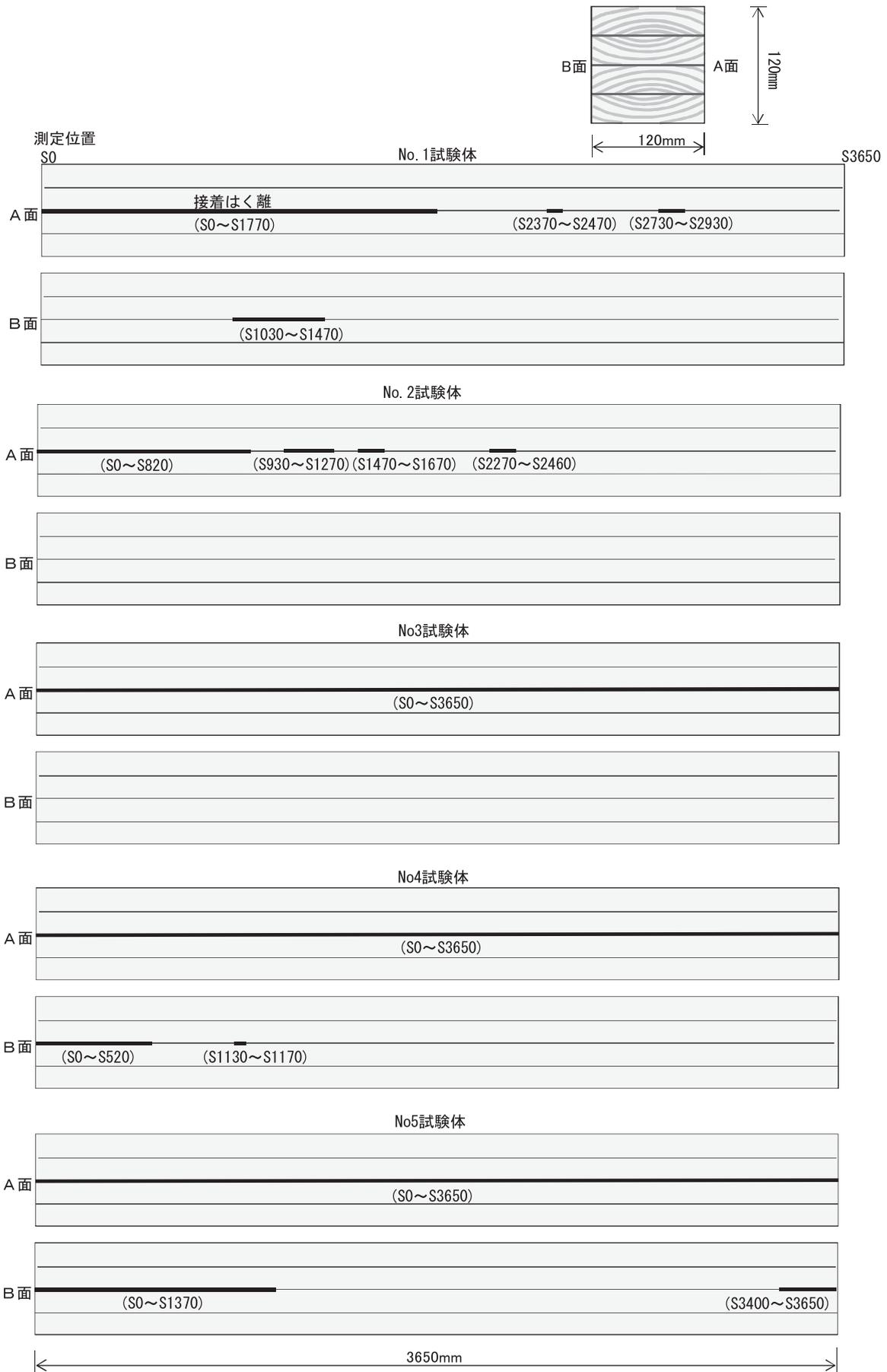


図 1 試験体の形状および接着はく離の位置

表 1 測定に使用した機器および測定条件

使用機器名		Doctor Wood	PUNDIT 7
センサー直径 (mm)		26	24
測定周波数 (kHz)		70	200
測定方法 ^{a)}		対面および側面	対面
センサー中心間距離 ^{b)} (mm)	対面	120	120
	側面	98	—
長さ方向測定間隔 (mm)	A面	50	50
	B面	50または100	50または100

注: ^{a)}^{b)}; 図2を参照。A面、B面: 図1を参照。

測定は、各試験体ともA面およびB面で行い、試験体長さ方向の測定間隔は、A面では50mm、B面では、はく離が存在する箇所では50mm、それ以外は100mmとした。Doctor Woodでは各点で3回の測定を行い、平均値を伝播時間とした。PUNDIT 7の対面測定では、測定間隔はDoctor Woodと同一とし、各点で1回測定した。PUNDIT 7では、測定開始時に伝播速度が変動することがあったため、しばらくセンサーを試験体に密着させ、伝播時間が変化しなくなった時点測定値とした。伝播速度は、下記のとおり算出した。

$$V = \frac{DS}{t} \text{ (m / sec)}$$

V: 伝播速度

DS: 超音波の最短伝播距離 (対面測定120mm、側面測定98mm)

t: 伝播時間

測定終了後、試験体を長さ方向に50mm間隔で鋸断し、図2に示す木口断面におけるはく離幅を実測した。

3. 結果と考察

3.1 No.1試験体

図3に結果を示す。(a)はDoctor Woodの側面測定、(b)はDoctor Woodの対面測定、(c)はPUNDIT 7の対面測定の結果である。第1報⁴⁾ および第2報⁵⁾ では、はく離が存在する側面とその反対側面との伝播速度を比較することにより、接着はく離が検出できる可能性があることを示した。そこで、各図には伝播速度ではなく、下式に示す、A面とB面との伝播速度の差 (以下Vdtとする) を記した。

$$Vdt = VA_t - VB_t$$

ここで、VA_tは測定位置tにおけるA面の伝播速度、VB_tは測定位置tにおけるB面の伝播速度である。また、

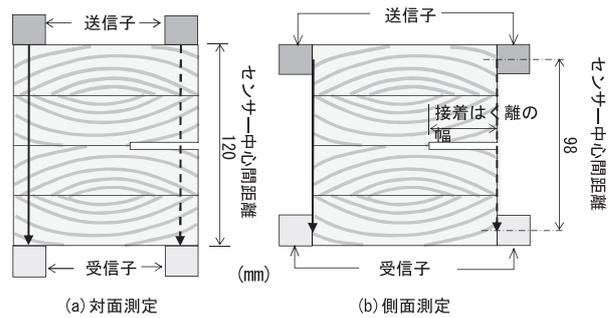


図 2 測定方法

各図中には、A面およびB面におけるはく離幅の実測値も併記した。

3.1.1 Doctor Wood

Doctor Woodの側面測定では、試験体の長さ方向両端部分でVdtは低く、中央部では高かった。はく離はA面の測定位置S0~S1770にかけて存在しており、この範囲では、Vdtとはく離幅とは対応していた。はく離箇所と正常箇所とを区分する手法として、Vdtに閾値 (以下Vthとする) を設け、これを超える低下が発生したならばはく離と見なすことが考えられる。しかし、第1報⁴⁾ で示したとおり、同一側面においても、伝播速度は節や木理の影響により変動する。したがって、Vthを一概に0m/secに設定することは困難であると予想される。そこで、図に示すとおりVthを-50、-100、-150、および-200m/secと仮定し、その妥当性について検討した。

図3 (a) に示すとおり、Vthを-50m/secとした場合、集成材の中央部分を除きVdtはVthを下回っているため、A面の測定位置S2200~S3650にはほとんどはく離が存在しないにもかかわらず、この部分がはく離と見なされてしまう。Vthを-100m/secとした場合も同様である。Vthを-150m/secとすると、A面にはく離が存在するS0~S1770において、20~25mm幅前後のはく離が存在する大部分をはく離として区分できる。はく離が存在しない箇所については、一部でVdtはVthを下回るものの、それ以外では、VdtはVthを上回っている。Vthを-200m/secまで低下させると、20mm前後のはく離が存在する一部でVdtはVthを上回る。したがって、Vthとしては、図3 (a) 中に太破線で示したとおり-150m/sec付近が妥当と考えられる。

図3 (b) には、Doctor Woodの対面測定の結果を示す。Vdtの変動は側面測定より小さかった。そのため、図中に示したとおりVthを-100m/secとすると、はく離が存在する大部分をはく離として検出することが可能であると思われる。

3.1.2 PUNDIT 7

第1報⁴⁾では、はく離幅が30mm以上であれば、PUNDIT 7の対面測定における検出感度は高かったことを報告した。しかし、No.1試験体のはく離幅は30mm未満であるため、はく離の検出は難しいものと予想される。また、超音波周波数がDoctor Woodより高いため発信した超音波の拡散は小さく、節や木理の影響による伝播速度の変動が相対的に大きくなると考えられる。図3 (c) に示すとおり、測定位置S0～S500ではVdtが0～300m/secの間で変化し、また、はく離が存在しないS3300付近

では約-250m/secまで低下している。そのため、閾値の設定は困難であった。

3.2 No.2試験体

図4 (a) ～ (c) に、No.2試験体の結果を示す。

3.2.1 Doctor Wood

同試験体のA面におけるはく離幅は、測定位置S50で約30mmであり、S50以降は漸減しているため、閾値設定はNo.1試験体と同様に難しいと予測される。図4 (a) に示すとおり、側面測定では閾値の設定は困難であった。一方、対面測定では、図4 (b) に示すとおりVthを-100m/secとすれば、比較的精度良くはく離が検出できるものと思われる。

3.2.2 PUNDIT 7

図4 (c) に示すとおり、はく離幅が0mmになるS900付近ではVdtも増加しており、はく離幅の増減とVdtの増減は概ね一致していた。Vthを-100m/secに設定すれば、比較的精度良くはく離が検出できるものと思われる。

3.3 No.3試験体

3.3.1 Doctor Wood

No.3試験体には、全長にわたり20mm超30mm以下の幅のはく離が存在した。したがって、検出は比較的容易であるものと予測される。Doctor Woodの側面測定では、図5 (a) に示すとおり、Vdtは全長にわたって0m/sec未満であり、Vthを-50m/secに設定しても、全長にわたってはく離が存在すると区分される。対面測定でも、図5 (b) に示すとおりVdtは全長にわたって0m/sec未満であり、Vthを-50m/secとすると、全長にわたってはく離が存在すると区分できる。

3.3.2 PUNDIT 7

図5 (c) に示すとおり、PUNDIT 7の対面測定においても、Vdtは全長にわたり0m/sec以下であった。Vthを0m/secとすれば、全長にわたりはく離が存在すると判定される。Vthを-50m/secとすれば、S2500およびS2900付近の2カ所において、Vdt>Vthとなるものの、VdtがVthを上回る区間はわずかであり、Vthを-50m/secとしても妥当であると考えられる。

3.4 No.4試験体

3.4.1 Doctor Wood

No.4試験体のA面には全長にわたりはく離が存在し、その幅は10～35mmであった。また、B面のS0～S520にも、20mm幅未満のはく離が存在した。したがって、A面およびB面のはく離が重複するS0～S600付近のVdtの変化が重要と考えられる。

図6 (a) に示すとおり、側面測定では、ほぼ全長にわたりVdtは0m/sec以下であった。S0～S600区間でのVdt

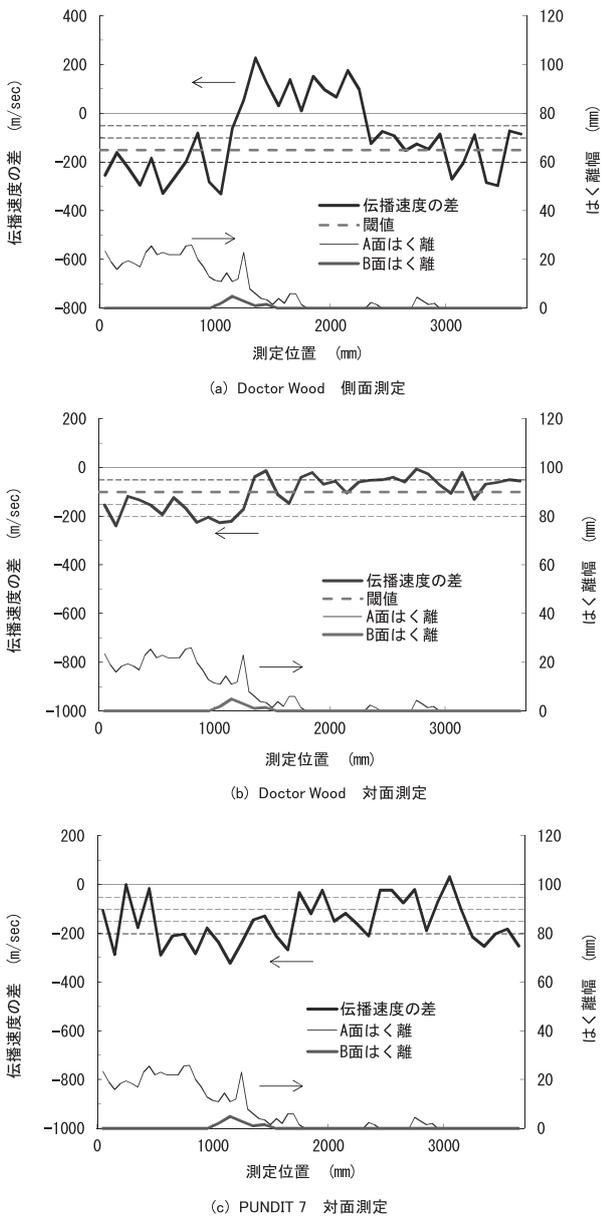


図3 No.1試験体の結果

注:伝播速度の差 = (A面の伝播速度) - (B面の伝播速度)。
 閾値:伝播速度の差について、同値以下をはく離と見なす値。
 測定位置, A面, B面:図1を参照。はく離幅:接着はく離の幅、
 図2を参照。

は変動しており、減少した後増加した。この減少は、A面におけるはく離幅の増加に起因するものと推測され、一方、その後のVdtの増加は、同面におけるはく離幅の減少に対応しているものと考えられる。したがって、側面測定では、B面に存在するはく離がVdtに及ぼす影響は小さかったと考えられる。図に示すとおり、Vthは0m/secが適当と考えられる。

対面測定は図6 (b) に示すとおりで、Vdtは全長にわたり0m/sec未満であった。VdtはS0から顕著に低下しており、これは先述のとおりA面におけるはく離幅の増加によるものと考えられる。したがって、B面のはく離

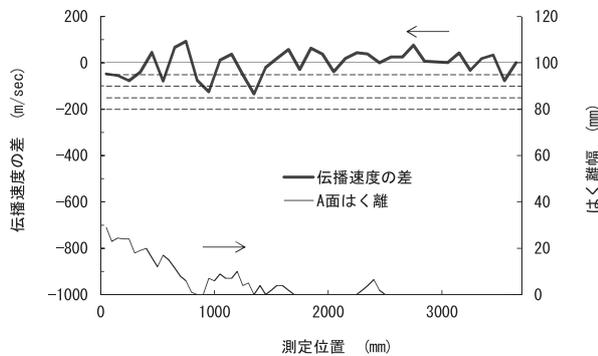
がVdtに及ぼす影響は、対面測定でも小さかった。Vthは、0m/secもしくは-50m/secが適当と考えられる。

3.4.2 PUNDIT 7

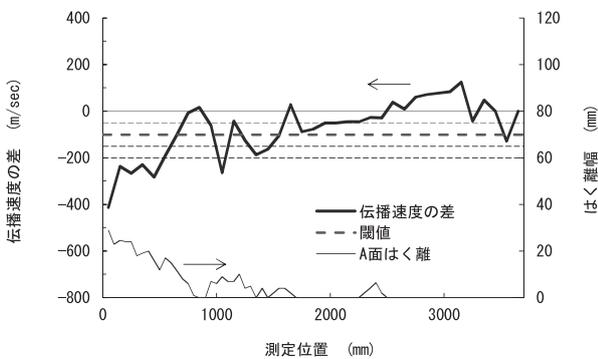
図6 (c) に示すとおり、Vdtは全長にわたり-50m/sec未満であった。VdtはS0より低下しており、これは3.4.1で記したとおり、A面におけるはく離幅の増加に起因するものと考えられる。図より判断すると、S0~S520に存在するB面はく離の影響は見受けられない。Vthは、-50m/secが適当と考えられる。

3.5 No.5試験体

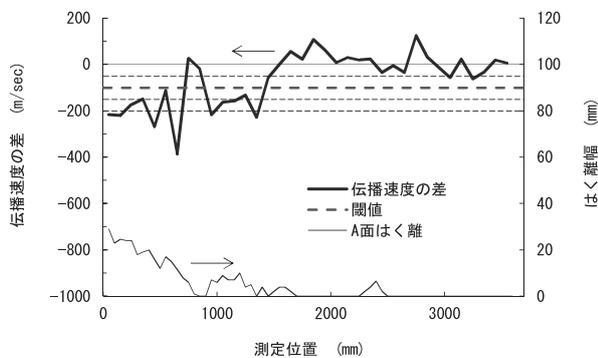
3.5.1 Doctor Wood



(a) Doctor Wood 側面測定



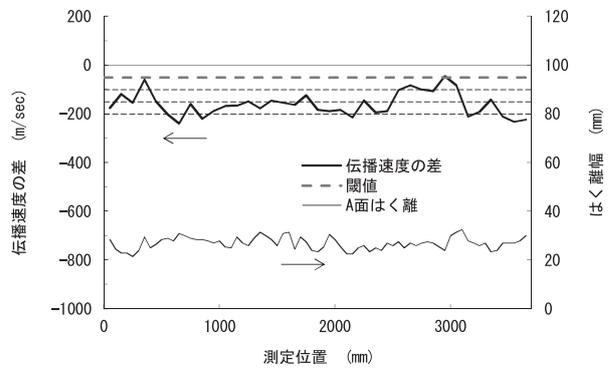
(b) Doctor Wood 対面測定



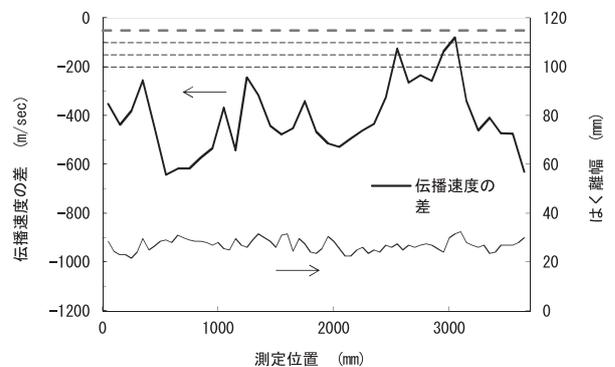
(c) PUNDIT 7 対面測定

図4 No.2試験体の結果

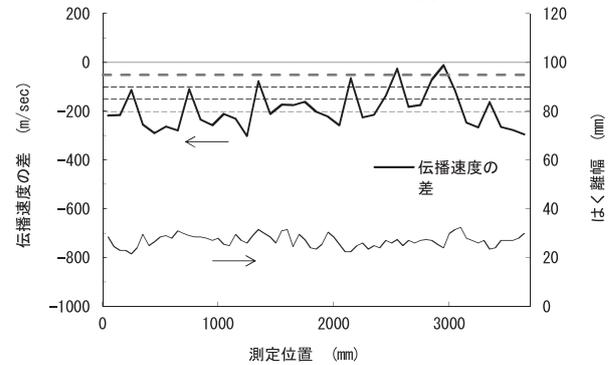
注:伝播速度の差、閾値、はく離幅、A面、B面:図3を参照。



(a) Doctor Wood 側面測定



(b) Doctor Wood 対面測定



(c) PUNDIT 7 対面測定

図5 No.3試験体の結果

注:伝播速度の差、閾値、はく離幅、A面、B面:図3を参照。

No.5試験体には、A面のほぼ全長およびB面の一部にはく離が存在した。しかし、それぞれのはく離幅は他の試験体よりも小さく、大部分が20mm幅以下であることから、検出は困難であると予測される。

図7 (a) に示すとおり、側面測定でのVdtは0m/sec前後で変動し、顕著な変化としては、S3000過ぎからの低下が挙げられる。これは、A面におけるはく離幅の増加に対応するものとも見なされる。S3300付近からVdtが増加に転じた理由は、B面においてはく離幅が増加したためと推測される。Vdtとはく離幅との対応が見られたのはこの箇所のみであるため、Vthの設定は困難であった。

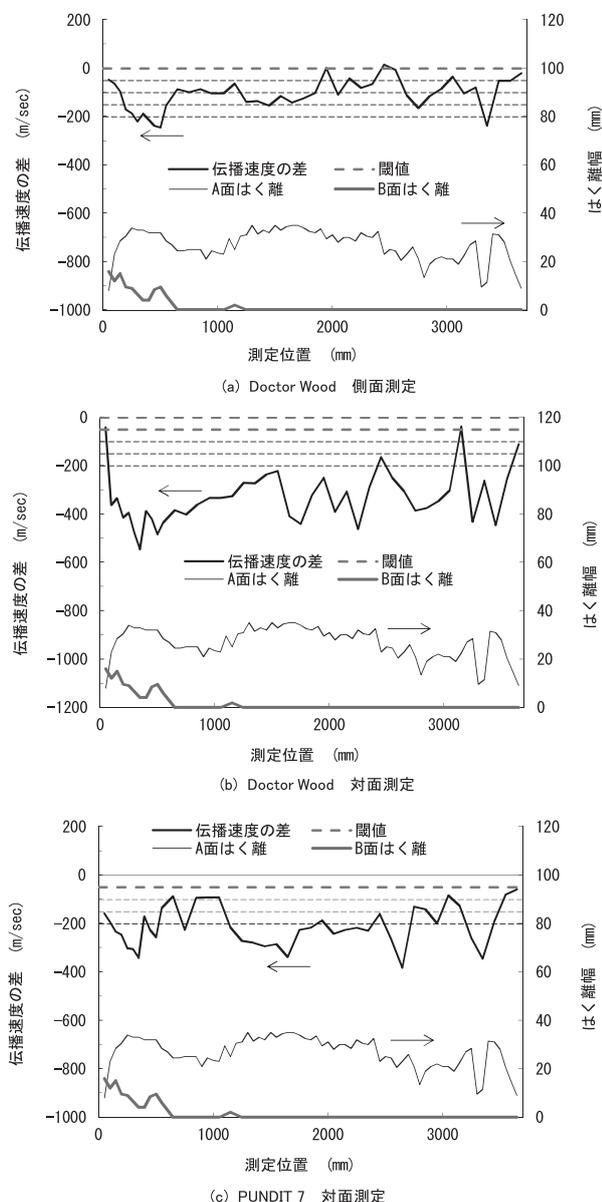


図6 No.4試験体の結果

注:伝播速度の差、閾値、はく離幅、A面、B面:図3を参照。

図7 (b) に、対面測定の結果を示す。A面のはく離とB面のはく離が重複するS0~S1200では、A面のはく離幅がB面より大きいにもかかわらず、Vdtは0m/secより大きかった。S1200~S2500では、Vdtが0m/secを下回る箇所も存在するものの、A面のはく離幅とは対応しておらず、変動も大きい。唯一はく離幅と対応していると考えられるのは、S3000過ぎからの低下である。しかし、対応している区間は短いため、側面測定と同様、Vthの設定は困難と考えられる。

3.5.2 PUNDIT 7

図7 (c) に示すとおり、Vdtが顕著に低下しているのはS1500~S2500にかけて、およびS2900~S3600にかけてであった。前者は、A面およびB面ともはく離幅は小さいため、Vdtの低下は木理等の影響が考えられる。S2900~S3600でのVdtの低下は、Doctor Woodと同様、A面ではく離幅増加に対応するものと思われる。しかし、はく離幅とVdtとが対応している区間は短く、閾値の設定は困難と考えられる。

4. 結論

製造時にはく離が生じた、オウシュウアカマツ4プライ小断面集成材5体の超音波伝播速度を計測し、計測方法および超音波周波数とはく離の検出感度の関係を調べた。その結果、全長にわたり、主として一方の側面のみ20mm幅超のはく離が存在した試験体では、伝播速度の低下は明確であった。はく離が存在しないか、もしくは、よりはく離幅が小さい反対側の伝播速度との差を算出し、これを指標とした閾値を検討したところ、閾値は0m/secもしくは-50m/secが妥当であった。これに対し、20mm幅超のはく離が部分的に存在する場合、閾値は明確とは言えず、また、閾値の設定が可能と考えられた場合、その値は-100m/secもしくは-150m/secと低かった。はく離幅が20mm未満の場合、はく離の検出は難しく、更にもう一方の側面にはく離が存在した場合、はく離の検出は不可能であった。

引用文献

- 1) 佐藤敬一:平成元年度科学研究費補助金 研究成果報告書“木材および木質材料の加工ならびに材料評価へのAEの適用”, 36-41 (1990).
- 2) 佐藤敬一:平成2年度科学研究費補助金 研究成果報告書“AE法およびTDR法を用いた木質材料のオンライン品質管理システムの開発”, pp70 (1991).

- 3) Nondestructively Inspect Material Integrity With An Airborne Ultrasonic Beam <http://www.ndt.net/article/1298/ndts/ndts.htm>. Accessed April 29, 2014
- 4) 柳川靖夫：超音波伝播速度の測定による集成材接着はく離の検出：奈良県森技セ研究報告, 43, 11-22 (2014)
- 5) 柳川靖夫：超音波伝播速度の測定による集成材接着はく離の検出（第2報）：奈良県森技セ研究報告, 44, 59-66 (2015)

(2016年 4月18日 受理)

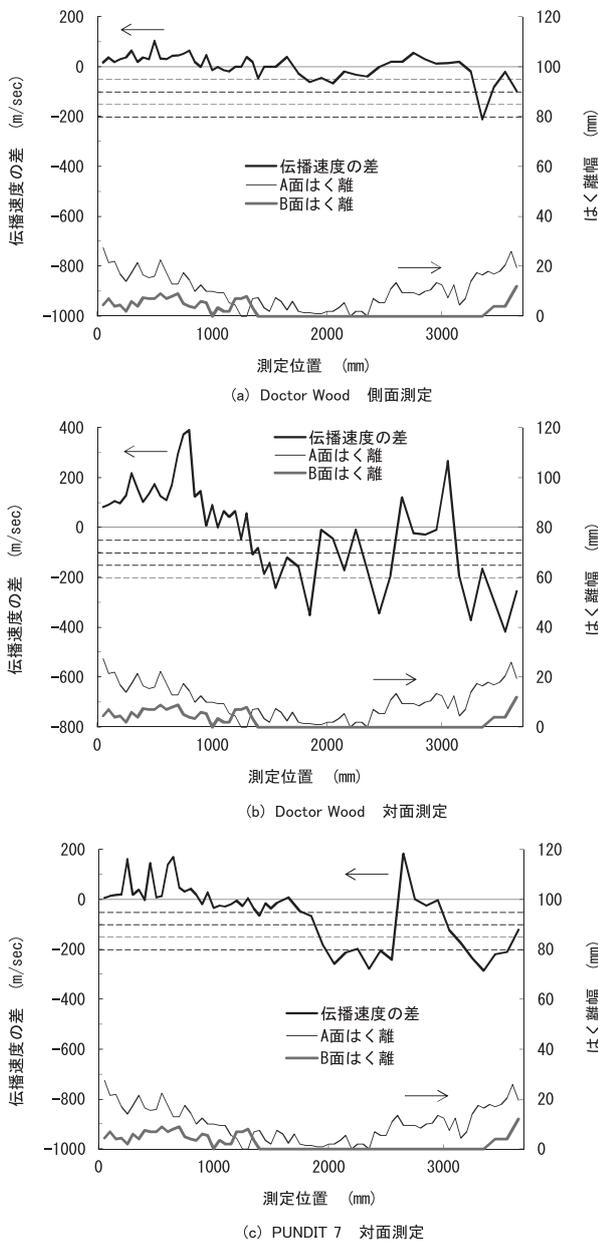


図7 No.5試験体の結果

注：伝播速度の差、閾値、はく離幅、A面、B面：図3を参照。