

## 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) 製品における接着はく離の検出

柳川 靖夫

工場において製造された集成材で、接着はく離が生じた製品の接着はく離を、超音波伝播時間を測定することにより検出することを試みた。試験体として、オウシュウアカマツの小断面集成材および中断面集成材を用い、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。小断面集成材では、Doctor Woodを使用した場合、超音波の発振子および受信子(センサー)を、接着層を含む側面に配置すると接着はく離の検出が可能と考えられた。PUNDIT 7では、接着層を挟んでセンサーを対面に配置すると接着はく離の測定が可能と考えられた。中断面集成材では、測定周波数が高いPUNDIT 7を使用すると、センサーの配置にかかわらず、接着はく離の検出は不可能であった一方、Doctor Woodでは、センサーを接着層を含む側面に配置し、センサー間距離を一定値以下とすることにより、接着はく離は検出可能と考えられた。

### 1. はじめに

近年、集成材は短時間で大量生産されており、以前と比較して、適正な接着条件の範囲は狭まっているものと考えられる。そのため、製造条件が変動するとはく離の発生が危惧され、大量生産と相まって短時間で多くの不良品が発生するおそれがある。同様に大量生産される合板や単板積層材では、はく離を製造ライン上で非破壊的に検出する技術<sup>1-3)</sup>が開発・導入されており、それには主として超音波が使用されている。今後、集成材でもはく離の非破壊検出が課題と考えられ、超音波は有望な手法の一つと思われる。著者は、超音波伝播速度(以下伝播速度とする)を測定して集成材のはく離を非破壊的に検出することを試みている。既報<sup>4)</sup>では、人為的にはく離を作製した集成材を用いて試験を行い、一定規模以上のはく離であれば、伝播速度を測定することにより非破壊的に検出可能であることを報告した。

本報では、製品の接着はく離が検出可能であるか否かを検証するため、製造現場で発生した、はく離を含む集成材の伝播速度を測定し、はく離を検出することを試みた。

### 2. 材料および方法

#### 2.1 試験体および測定方法

##### 2.1.1 小断面集成材

はく離を含む同一等級構成オウシュウアカマツ4プライ集成材を使用した。幅および厚さは120mm、長さは3650mm、接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤で、通シラミナが使用されていた。接着層を含む集成材の側面(以下側面とする)の中、一方の側面のみに、図1に示すとおり、3接着層中の中央接着層の一部にはく離が存在した。その位置は、試験体の左端をL0、右端をL3650とした場合、L0~L820、L930~L1270、L1480~L1660、およびL2270~L2460であった。

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、測定条件は表1のとおりであった。Doctor Woodの発振子および受信子(以下両者を合わせてセンサーとする)の表面はゴムで被覆され、バネが内蔵されており、センサーを被試験材に一定の力で押しつけると超音波が発振される仕組みである。PUNDIT 7の測定では、センサー表面をシリコンゴムで被覆し、シリコンゴムとセンサーとの間を専用グリスで充填して測定を行った。

Doctor Woodでは、図1に示すとおりセンサーを側面に配置した方法(以下側面測定とする)、および接着層

を挟むようにセンサーを配置した手法（以下対面測定とする）により測定を行った。長さ方向の測定間隔は、接着はく離を含む側面（以下はく離側面とする）は50mmとし、接着はく離が存在しない側面（以下反対側面とする）は100mmとした。それぞれの測定点で3回ずつ伝播時間を測定して平均値を求め、以下のとおり伝播速度を算出した。

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

ここで、Vは伝播速度であり、DSは超音波の最短伝播距離で、側面測定の場合はセンサー中心間距離とし、図1 (b) に示すとおり98mmであった。対面測定の場合は、図1 (c) に示すとおり120mmであった。tは伝播時間の平均値である。

PUNDIT 7は、対面測定のみとした。測定位置はDoctor Woodと同じとし、センサーを試験材に押し当て、数値が変動しなくなった時点を送信時間とした。測定は各点で1回行い、Doctor Woodの対面測定と同様にして伝播速度を求めた。

伝播速度の測定後、集成材を長さ方向に50mm間隔で鋸断し、木口面におけるはく離の幅を測定した。

表1 超音波伝播時間の測定条件

項目	単位	測定機器	
		Doctor Wood	PUNDIT 7
測定周波数	(kHz)	70	200
測定分解能	(μsec)	1	0.1
発振励起電圧	(V)	不明	1000
パルス繰り返し頻度	(Hz)	不明	10

2.1.2 中断面集成材

接着はく離を含む、異等級対象構成オウシュウアカマツ11プライ集成材を使用した。幅は105mm、厚さは330mm、長さは650mm、接着剤は水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤で、通シラミナが使用されていた。図2に示すとおり、一方の側面の10接着層中、3接着層にはく離が存在した（以下G1~G3とする）。その位置は図中に示すとおりで、試験体の左端をL0とすると、G1はL450~L625に、G2はL25~L600に、G3では全層（L0~L650）にはく離が存在した。

伝播速度の測定にはDoctor Woodを使用し、側面測定のみとした。これは、既報<sup>4)</sup>と同様、PUNDIT 7および

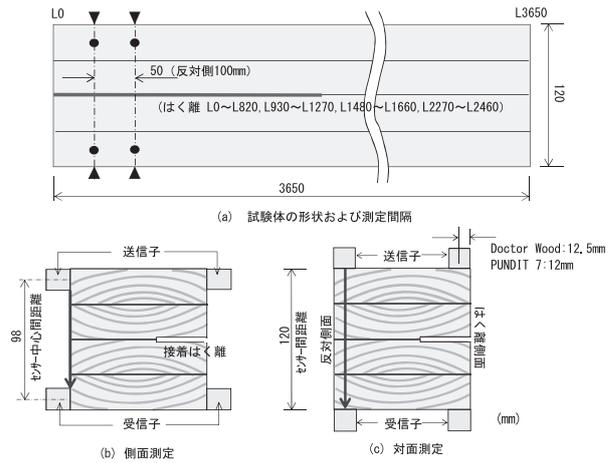


図1 小断面集成材の超音波伝播速度の測定

注:長さ方向測定間隔: はく離面50mm、反対側面: 100mm。●: 側面測定でのセンサーの中心位置。▲, ▼: 対面測定でのセンサーの中心位置。L0, L3650: 長さ方向の位置表示。

Doctor Woodの対面測定では、試験体が厚く超音波が伝播しなかったためである。センサー中心間距離は、図2に示すとおり、90mm、120mm、150mm、および300mmとした。以下、S300等と表記する。なお、S150では、接着はく離を含む150mm区間（以下上部S150とする）、および接着はく離を含まない150mm区間（以下下部S150とする）について測定を行った。長さ方向の測定間隔は、はく離側面では25mmとし、反対側面では50mmとした。伝播速度の算出は、2.1.1と同様とした。

伝播速度の測定終了後、長さ方向に25mm間隔で鋸断し、木口面での接着はく離の幅を測定した。その際、図3 (a) に示すとおり、はく離が表面まで達しているはく離を端部はく離とし、図3 (b) に示す、表面まで達してしないはく離を内部はく離として区分した。

3 結果と考察

3.1 小断面集成材

3.1.1 Doctor Wood

図4に、側面測定の結果を示す。

はく離幅の実測値は、L0~L820ではL0が最大で約30mmであり、以後漸減してL820で0mmであった。L930~L1270では10mm前後で、L1480~L1660では2~4mm、L2270~L2460では最大で7mmであった。これらの区間内ではく離側面と反対側面との伝播速度を比較すると、L0~L700およびL900~L1600では、はく離側面

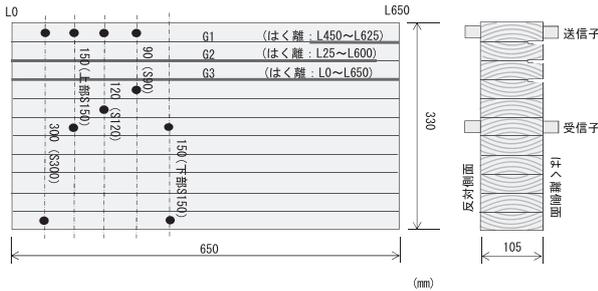


図2 中断面集成材の超音波伝播速度測定

注:長さ方向測定間隔:はく離側面:25mm、反対側面:50mm。●,L0,L650:図1を参照。G1~G3:はく離を含む接着層。

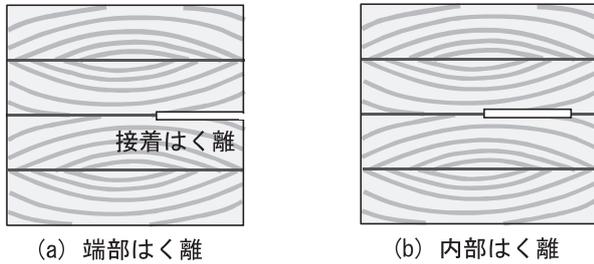


図3 はく離の種類

の伝播速度は反対側面より低かった。L1600以降ではく離側面と反対側面とを比較すると、伝播速度に大きな差は見られないことから、L0~L700およびL900~L1600では、はく離側面で伝播速度は低下したと見なせる。一方、L2270~L2460では、はく離側面での伝播速度の明確な低下は見られなかった。同区間ではく離幅は最大で7mmであり、既報<sup>4)</sup>の結果、すなわちセンサー中心間距離が83mmで、はく離幅が10mmの条件では伝播速度の低下はわずかであったことを考慮すると、L2270~L2460での伝播速度の低下はわずかであったと推測される。

以上のとおり、側面測定では、反対側面の伝播速度と比較することにより、一定規模以上のはく離が検出可能であることが示唆された。

図5に対面測定の結果を示す。

既報<sup>4)</sup>では、Doctor Woodの対面測定は側面測定より検出感度が低いことを報告した。本研究でも同様の結果であり、はく離側面と反対側面とで伝播速度を比較すると、両者の間に明確な差は無く、はく離は検出できなかった。

### 3.1.2 PUNDIT 7

図6に、PUNDIT 7の対面測定の結果を示す。

既報<sup>4)</sup>では、PUNDIT 7の対面測定はDoctor Woodより検出感度が高く、これは測定周波数が相対的に高いことが理由と考えられることを報告した。本研究でも、同様の結果が示唆される。すなわち、はく離が存在する区間では、はく離側面の伝播速度は反対側面よりも低く、また、伝播速度の変化とはく離幅の変化とが一致している場合が見られた。例えば、図中に矢印(↓および↑)で示したように、L900付近、L1600付近、およびL2400付近での伝播速度の変化は、はく離幅の変化とほぼ一致していた。したがって、PUNDIT 7の対面測定における検出感度は、Doctor Woodの側面測定より高いと考えられる。

しかし、製造現場での検査を考慮すると、L2400付近のような比較的短いはく離の検出は、困難であると思われる。すなわち、はく離が存在しない箇所ではく離側面と反対側面とを比較すると、伝播速度はそれぞれ一定ではなく変動していた。例えば、反対側面のL2700付近では、はく離は存在しないにもかかわらず伝播速度は低下した。したがって、短い区間での伝播速度の低下をはく離として区分すると、伝播速度の変動をはく離として検出するおそれがある。このことを考慮すると、製造現場ではく離検出では、長さ方向の同一位置において両側面の伝播速度を比較して、一方の伝播速度が低い区間が一定長さ連続する場合に、同区間をはく離として区分す

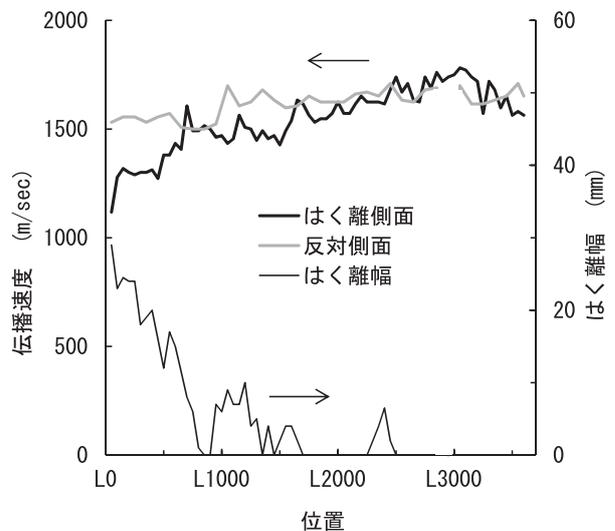


図4 小断面集成材の結果 (1) Doctor Wood 側面測定  
注:はく離側面,反対側面:図1を参照。はく離幅:木口面で測定した接着はく離の幅。

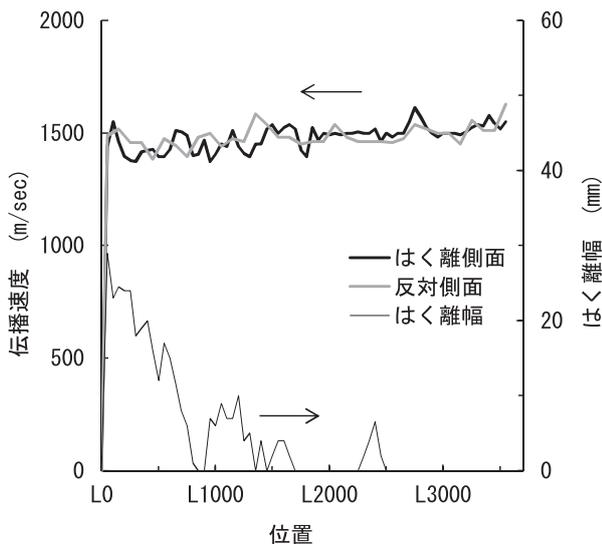


図5 小断面集成材の結果 (2) Doctor Wood 対面測定 注: 図4を参照

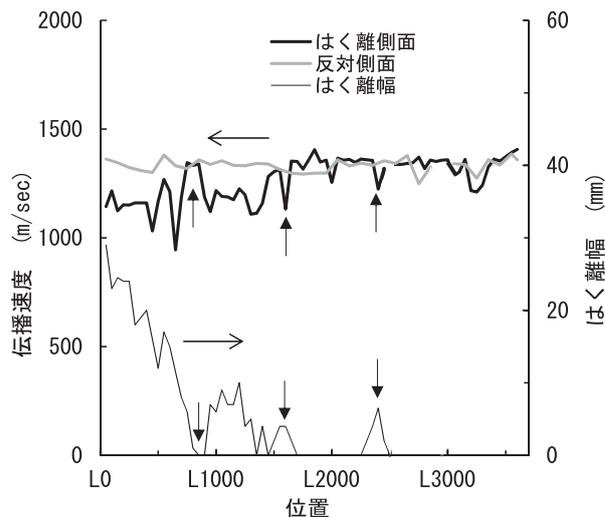


図6 小断面集成材の結果 (3) PUNDIT 7 対面測定 注: 図4を参照

るのが適当であると考えられる。

### 3.2 中断面集成材

図7に、S300の結果を示す。図7 (a) には、各位置におけるG1~G3の端部はく離の合計 (以下全端部はく離とする)、および端部はく離と内部はく離との合計である全はく離と伝播速度との関係を、図7 (b) には、各位置におけるG1~G3の端部はく離および内部はく離と伝播速度との関係を示した。

図7 (a) のとおり、全端部はく離は25~54mmで、全はく離は31~57mmであった。既報<sup>4)</sup>では、DoctorWoodの側面測定において、センサー中心間距離が105mmではく離幅が20mmの場合、伝播速度が低下したことを報告した。この結果より推測すると、条件により接着はく離の検出は十分可能と予測される。

全端部はく離が最大となるL450付近を含むL400~L600では、図に示すとおり、はく離側面の伝播速度は反対側面より低かった。しかし、反対側面の伝播速度を長さ方向と比較すると、L400~L600で増加している。この原因として、ラミナ材質の影響等が考えられる。また、他の区間で両側面の伝播速度を比較すると、伝播速度は近似していた。したがって、L400~L600で両側面の伝播速度に差が見られた理由をはく離の存在に帰することは困難と思われ、S300では、はく離は検出できていなかったと考えられる。

上部S150の結果を図8 (a) および (b) に、下部S150の結果を図8 (c) に示す。

上部S150では長さ方向の全長にわたり、はく離側面の伝播速度は反対側面よりも低かった。一方、図8 (c) に示した下部S150では、はく離側面と反対側面とで、伝播速度に大きな差は認められなかった。そのため、上部S150において、はく離側面の伝播速度が反対側面より低かったのは、接着はく離の影響が示唆される。また、L470付近より、はく離側面で伝播速度の低下が見られた。同位置におけるG1~G3のはく離は図8 (b) のとおりで、G1の端部はく離およびG2の内部はく離が増加しており、特にG1の端部はく離の増加は31mmと顕著であった。したがって、L470付近での伝播速度の低下は、主としてG1における端部はく離の増加に起因するものと推測される。以上のとおり、センサー中心間距離が150mmでは、幅30mm程度のはく離であれば、伝播速度を反対側面と対比することにより検出できるものと考えられる。

図9 (a) および (b) に、S120の結果を示す。

長さ方向の全長にわたり、はく離側面の伝播速度は反対側面より低かった。また、L470付近からの伝播速度の低下は、上部S150より大きかった。このように、S120では、1接着層における大きな端部はく離の出現が伝播速度に及ぼす影響は、S150よりも大きかった。これより、既報<sup>4)</sup>と同様に、センサー中心間距離を短くすることにより、製品でもはく離の検出感度は高まると思

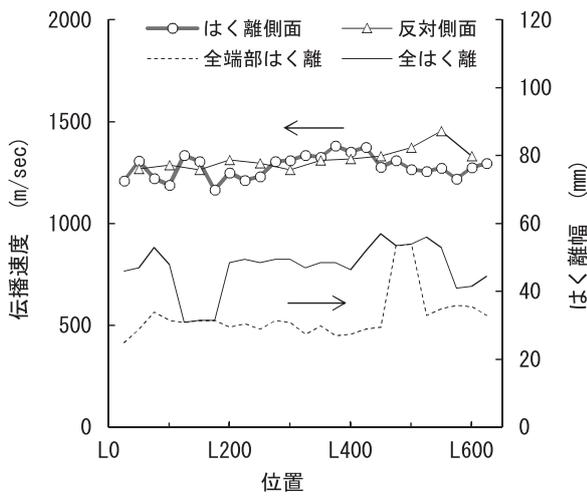
われる。また、L170~L370のはく離側面で、伝播速度の低下が見られた。同区間では、図9 (b) に示したとおり、L170付近からG1の内部はく離が増加している。しかし、G1で内部はく離が増加した区間はL170~L450で、一方、伝播速度の低下はL170~L370であり、両者は完全には一致していなかった。この理由として、内部はく離は表面が接着されているため一部の超音波が伝播

するものと考えられ、伝播速度に及ぼす影響は、相対的に小さいと思われることが挙げられる。

図10 (a) および (b) には、S90の結果を示す。

長さ方向の全長にわたり、はく離側面の伝播速度は反対側面より顕著に低かった。また、L470付近からの伝播速度の低下もS120より大きかった。これより、検出感度はS120よりも高まったと考えられる。一方、検出感度が向上していると考えられるにもかかわらず、S120で出現したL170~L370の伝播速度の低下は、S90では不明確であった。この原因として、以下の理由が挙げられる。

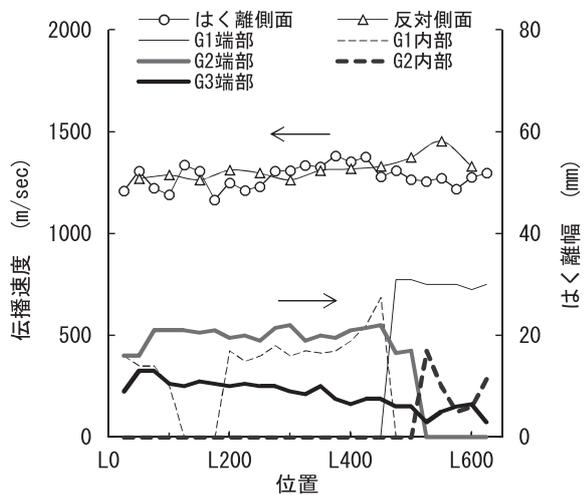
すなわち、S90は検出感度が高いことから、伝播速度は各接着層の状況に依存したのではなく、最も影響が大きかった接着層に依存したものと推測される。すなわち、L170~L370では、図10 (b) に示すとおりG2に端部はく離が存在したため、伝播速度はG2の端部はく離に依存したものと推測される。このことは、G1の内部はく離が消滅するL120~L170での、伝播速度の変化よりも読み取れる。同区間での伝播速度は、わずかに増加したのみであり、G1で内部はく離が消滅した影響はわずかであった。



(a) はく離合計との対比

#### 4. 結論

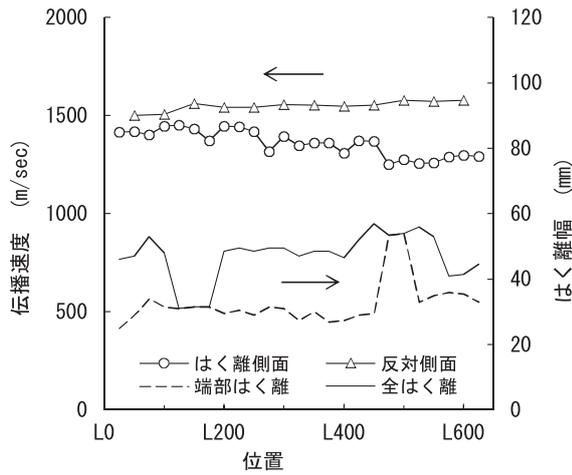
集成材製品で発生した接着はく離を、超音波伝播速度を測定して非破壊的に検出することを試みた。1側面のみに接着はく離を含む、断面が120mm角のオウシュウアカマツ4プライ集成材を使用した。(株) 秋田エスケイケイ製のDoctor Wood (周波数70kHz) およびCNS Farnell Ltd.製のPUNDIT 7 (周波数200kHz) を使用し、2種類の 방법으로伝播速度を測定した。その一つは、発振子および受信子(センサー)を、接着層を含む側面上に配置した方法(側面測定)で、もう一つは、センサーを、接着層を挟んで対面に配置した方法(対面測定)とした。その結果、一定規模以上の接着はく離であれば、Doctor Woodの対面測定を除き、長さ方向の同一断面で両側面の超音波伝播速度を比較することにより、はく離の検出が可能であった。次に、1側面のみに接着はく離を含む、幅105mm、厚さ330mmの、オウシュウアカマツ11プライ集成材を試験材とし、Doctor Woodを使用して、センサーの中心間距離を変化させて側面測定を行った。その結果、センサー中心間距離が短くなると検出感度が向上し、はく離が存在しない側面の超音波伝播速度と比較して、顕著に超音波伝播速度が低下し、はく離の検出が可能であった。



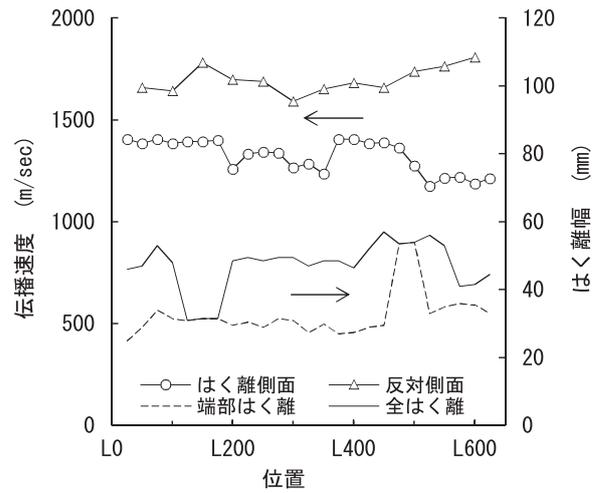
(b) 各接着層のはく離との対比

図7 中断面集成材の結果(1) S300

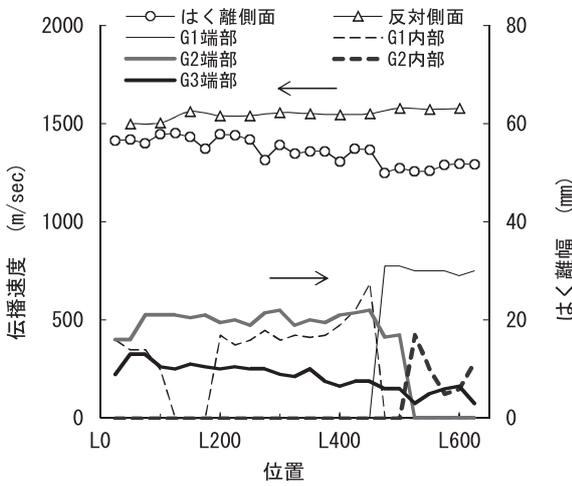
注:センサー中心間距離:300mm。はく離側面, 反対側面: 図2を参照。全端部はく離: 側面まで達している端部はく離の全接着層合計。全はく離: 端部はく離と内部はく離の全接着層合計。端部はく離および内部はく離は図3を参照。G1端部: 接着層G1での端部はく離, G1内部: 接着層G1での内部はく離, 以下G2端部, G2内部, G3端部も同様。G1~G3は図2を参照。



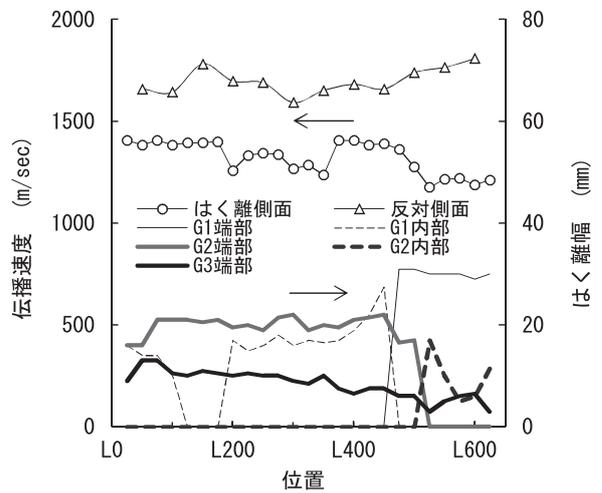
(a) 上部150mm はく離合計との対比



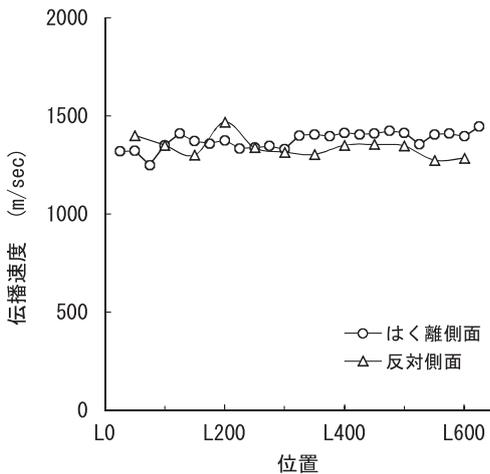
(a) はく離合計との対比



(b) 上部150mm 各接着層のはく離との対比



(b) 各接着のはく離との対比



(c) 下部150mm

図8 中断面集成材の結果(2)

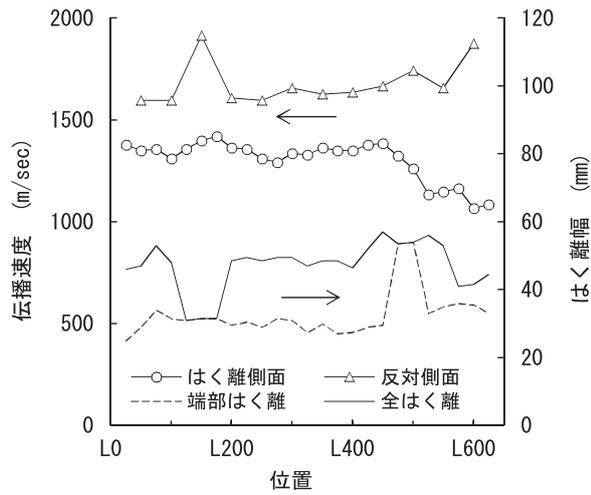
注: センサー中心距離:150mm。上部S150,下部S150: 図2を参照。その他は図7を参照。

図9 中断面集成材の結果(3) S120

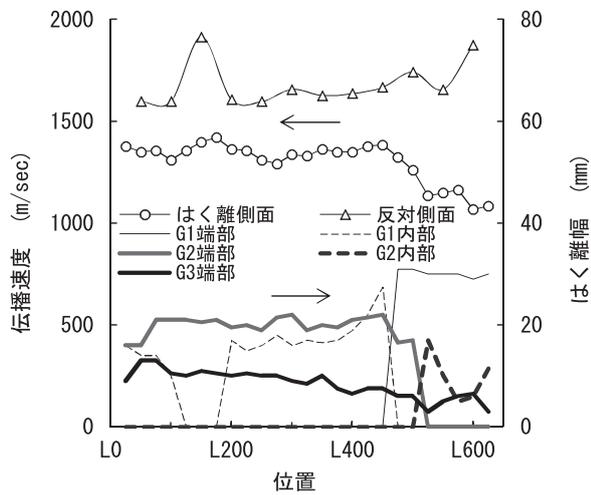
注: センサー中心間距離120mm。図7を参照。

### 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



(a) はく離合計との対比



(b) 各接着層のはく離との対比

図10 中断面集成材の結果 (4) S90

注:センサー中心間距離90mm。図7を参照。

はく離の検出: 奈良県森林七研報告, 43, 11-22 (2014)

(2015年4月15日受理)