論 文

海岸林学会誌 (*Journal of the Japanese Society of Coastal Forest*) 8(2)：80 − 85, 2009

任意の水平方向からの負荷に対する樹幹ひずみの測定方法

野口宏典[1*]・鈴木覚[1]・坂本知己[1]

A method to measure the strain on tree stems loaded to any horizontal direction

Hironori Noguchi[1], Satoru Suzuki[1] and Tomoki Sakamoto[1]

Abstract: To know whether strain gauge transducers can measure the dynamic behavior of tree stems subjected to any horizontal direction loading, we tested the original strain gauge transducer (Moore et al., 2005) and the improved strain transducer that we developed. The improved strain transducer differs from the original transducer mainly in symmetry. When a wooden pole was loaded to any right angle, the strain of the pole transduced by both the original and the improved transducer generally had a cosine relation to the angle between the front of the strain transducer and the loading. Therefore, the strain on a tree stem loaded to any horizontal direction can be estimated by composition of strains in two horizontal directions. Moreover, since the strains of the improved transducer are closer to a cosine curve than those of the original transducer, the improved transducer can estimate the strain on tree stems more accurately than the original.

1　はじめに

樹木は風や流水などにより物理的な負荷を受けると，曲がったり振動したりし，幹折れ，根返り，葉の欠損等により損傷することがある(例えば, Dunham and Cameron，2000)．その一方で，樹木は物理的負荷を受けることによりその勢いを弱め，樹木の背後にある建造物や農地等を保護する防災的機能を果たすことができる（たとえば，Heisler and Dewalle，1988; Danielsen ら，2005)．林帯を管理する上で，物理的負荷に関係する樹木の損傷や樹木の防災的機能を定量的に考慮することは重要なことであり，そのためには，物理的負荷に対する樹木の動的反応を定量的に理解することが必要となる．この定量的理解の必要性が特に高い林の例としては，強風や津波・高潮による氾濫流に曝される危険性が高く，物理的負荷という面で厳しい環境下にあり，防災的機能への要請が大きいことから，海岸林が挙げられる．こうしたことから，海岸林現地での調査や海岸林での現象を想定した風洞・水路での実験における測定を念頭に置き，物理的負荷に対する樹木の動的反応を測定する方法について検討した．

物理的負荷に対する樹木の動的反応を測定する方法として，変位計（たとえば，Milne, 1991)，ひずみゲージ（たとえば，Ennos, 1994)，加速度計（たとえば, White ら, 1976)，傾度計（たとえば, Fresch and Wilson, 1999）等の様々な装置がこれまで用いられてきた．これらの装置の中で，ひずみゲージは他の装置と比較して主に２つの長所を持つ．一つ目の長所は，他の装置は設置箇所の運動や位置を計測するものなので，樹木の変形を計測するためには複数の装置が必要だが，ひずみゲージは設置箇所のひずみを測定するので, 単体で変形を測定できることであり，二つ目の長所は，ひずみは樹木のダメージの直接的な指標として用いることができることである．これらの長所を持つことから，ひずみゲージは樹木の動的反応，特に変形の測定に適している．

しかし，ひずみゲージには短所もある．主な短所としては，滑らかでない樹木表面へのひずみゲージの接着が難しいこと，接着剤を乾燥させなければならないので接着直後に測定を開始することができないこと，ひずみゲージの測定対象範囲は 1cm 程度であり, 樹木のサイズに比べて短いことが挙げられる．

ひずみゲージの短所を補うため，Moore ら（2005）は測定対象物である樹木にネジで取り付けることができるひずみ変換器を開発した．ひずみ変換器には測定対象物の変形が伝わる箇所があり，そこのひずみがひずみゲージにより測定される．ひずみ変換器の特長としては，金属製の表面を滑らかに加工できるので樹木表面に比べてひずみゲージの貼付が容易であること，接着材ではなくネジにより樹木に設置されるので設置後すぐに測定を開始できること，ひずみ測定の対象範囲が拡大できることが挙げられ，これらによりひずみゲージの前述の短所を補うことができる．以上のことから，樹木の動的反応を測定する方法として, ひずみ変換器を用いることとした．

Moore ら（2005）はひずみ変換器に対して正面方向からの負荷がかかる場合の性能試験を行なったが他の方向に関しては行なっていない．自然環境下では, 樹木にかかる負荷の方向は一定でないことから，特定の方向だけでなく任意の方向からの負荷に対する樹木のひずみを測定できることが望ましい．そこで，著者らは任意の水平方向からの負荷に対する樹木のひずみがひずみ変換器によって測定可能かどうかを検討することとした．また，任意方向からの負荷に対するひずみ測定を行う上で，Moore ら（2005）のひずみ変換器（以下，Moore 型ひずみ変換器）の形状が非対称であることが障害になると考えられたことから，この点に関して改良を試みた新型ひずみ変換器を作成し，Moore 型と性能を比較した．

2　方法

Moore 型ひずみ変換器と，Moore 型に改良を加えた

[1] 独立行政法人森林総合研究所，Forestry and Forest Products Research Institute, 1 Matsunosato, Tsukuba 305-8687 Japan

*Corresponding author: noguh @ ffpri.affrc.go.jp

新型ひずみ変換器を作成し，正面方向の負荷に対する変換器の性能試験，負荷の方向を樹幹に見立てた棒状の測定対象物との直交を保ちながら変化させた場合の性能試験，および実際の樹木での性能試験を行なった．

2.1　ひずみ変換器の形状

まず，Moore 型ひずみ変換器を作成した．変換器の素材にはアルミニウムを用い，変換器のひずみ集中箇所にはひずみゲージ（KFG-1-120-D16-23，共和電業）を貼付した（図 1）．Moore 型ひずみ変換器は，正面形状が長さ方向に対して対称でないことから，負荷の方向が測定対象物と直交する平面上を左回りにずれる場合と右回りにずれる場合(図２)とでは，ひずみ変換器正面方向と負荷方向の成す角の絶対値と負荷の大きさが同じであっても，ひずみ測定値に差が生じる可能性が考えられる．これを避けるために，正面から見た形状が長さ方向に対して対称である新型ひずみ変換器を作成した（図３，図４）．新型ひずみ変換器の素材とひずみゲージは，Moore 型ひずみ変換器と同じものを用いた．

Moore型に対する新型ひずみ変換器の長所として，対称性以外には，正面形状の幅が小さいことが挙げられる．物理的負荷として樹木に作用する流れの方向が概ね一定である風洞や水路での実験では，主な流れ方向のみの樹幹ひずみを測定することが多い．主な流れ方向のみの測定を行なう場合には，ひずみ変換器の正面が，流れに対して樹幹の裏側となるように設置して測定を行なう．このように変換器を設置する場合，Moore 型ひずみ変換器は正面形状の幅が樹幹を超えてしまい，流れに対して直交して突き出してしまうことで流れと影響を及ぼしあうおそれがある．これに対して，新型ひずみ変換器は正面形状の幅が小さいので，変換器の設置に十分な幹の太さがあれば，変換器は流れに対して樹幹の背後に収まるので流れと直接的に影響を及ぼしあうことはない．

2.2　ひずみ変換器の性能試験

2.2.1　対象物のひずみと変換ひずみの比較

測定対象物のひずみとひずみ変換器により変換されたひずみを比較するため，樹幹に見立てた木製の角棒（断面：4.5 cm 角）に，ひずみゲージ（KFG- 5- 120-C1-5，共和電業）とひずみ変換器を設置し，ひずみ変換器に対して正面方向に負荷をかけて測定を行なった（図５）．この試験は，Moore 型と新型ひずみ変換器に対してそれぞれ行なった．実際の樹幹は鉛直方向に立っているが，負荷の方向と大きさの制御

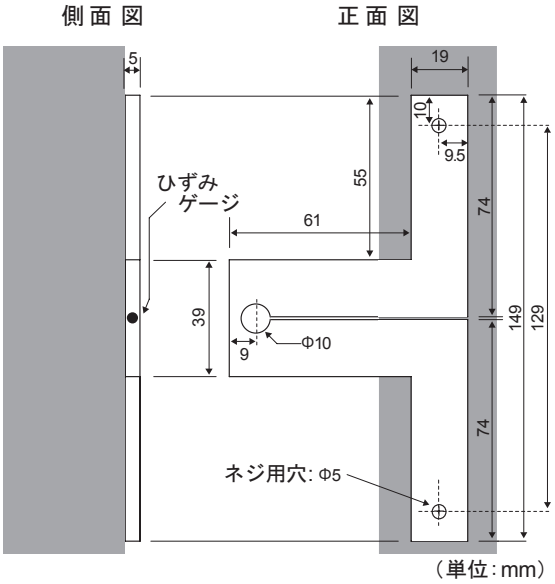


図1. Moore型ひずみ変換器

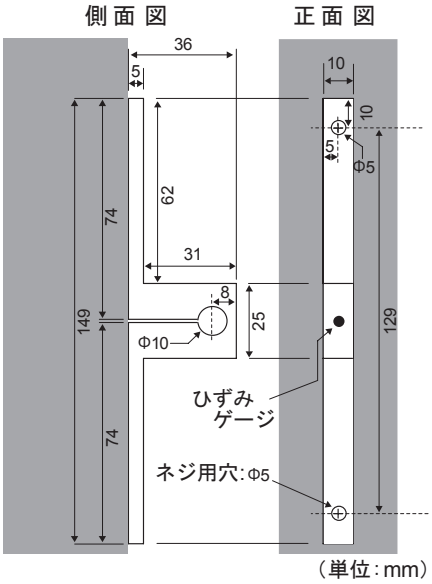


図3. 新型ひずみ変換器

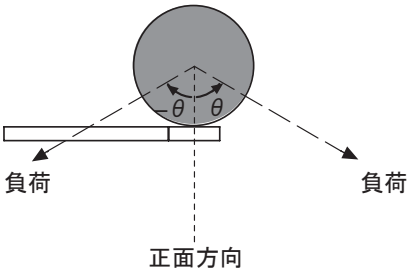


図2. Moore型ひずみ変換器の正面方向と負荷が成す角

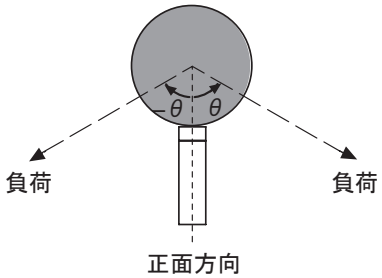


図4. 新型ひずみ変換器の正面方向と負荷が成す角

を容易にするため，角棒は水平になるように固定し，鉛直方向に負荷をかけることとした．棒の先端からひずみ変換器までの距離は 45 cm ，変換器から台までの距離は 20 cm とした．棒の先端から 5 cm の箇所に重りを提げることによりひずみ変換器の正面方向への負荷を棒にかけた．重りの重量は 1 kg から 6 kg まで 1 kg ずつ変化させた．また，ひずみ変換器とひずみゲージを設置した面が上になるように棒を 180 ° 回転した状態での試験も同様に行なった．

2.2.2　任意の直交方向への負荷に対する性能

樹幹にかかる負荷の水平成分の方向がひずみ変換器正面方向からずれた場合のひずみ変換器の性能を試験するため，樹幹に見立てた木製丸棒（断面：直径 4.5 cm）にひずみ変換器を設置して，負荷の方向を棒と直交する平面内で変化させて測定を行なった(図６)．この試験も，Moore 型と新型ひずみ変換器に対してそれぞれ行なった．実際の樹幹は鉛直方向に立っているが，負荷の方向と大きさの制御を容易にするため，棒は水平になるように台に固定し，鉛直方向に負荷をかけることとした．棒の長さ方向を軸にして棒を回転させることにより，負荷の方向を棒との直交を保ちながら変化させた．棒の先端からひずみ変換器までの距離は 45 cm ，変換器から台までの距離は 20 cm とした．先端から 5 cm の箇所に 6 kg の重りを提げることにより負荷をかけた．棒の回転は 30 ° ずつ行なった．

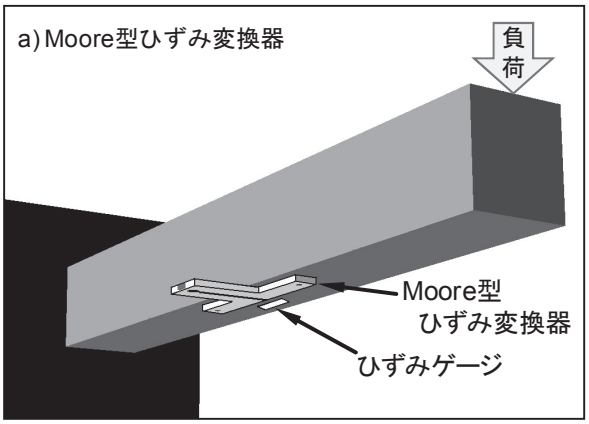
2.2.3　実物の樹木での測定

実物の樹木に設置した場合のひずみ変換器の性能を確認するため，２つの新型ひずみ変換器をスギ（樹高 4 m，胸高直径 10 cm）の幹の高さ 1 m の箇所に設置して負荷の大きさと方向を変化させて測定を行なった．２つのひずみ変換器は概ね直交する水平２方向のひずみを測定できるように設置した（図７）．樹幹の高さ 1.5 m の位置にロープを架け，水平から 15 ° 下方に引くことにより負荷をかけた．負荷の方向は水平であることが望ましかったが，負荷の大きさと方向を制御するためにロープの一方の端を固定する必要があり，固定できる箇所の高さが低かったため，下方に負荷をかけることとした．負荷の水平成分の方向は４通りに変化させた（図７）．負荷の大きさはロープに繋いだロードセル（LUX-A-2KN，共和電業）によって測定した．

3　結果と考察

3.1　対象物のひずみと変換ひずみの比較

ひずみ変換器により変換された角棒のひずみとひずみゲージにより直接測定した角棒のひずみの関係は，Moore 型ひずみ変換器と新型ひずみ変換器ともに，原点を通る直線で概ね近似できるものだった(図８)．このことから，Moore 型と新型ともに，ひずみ変換



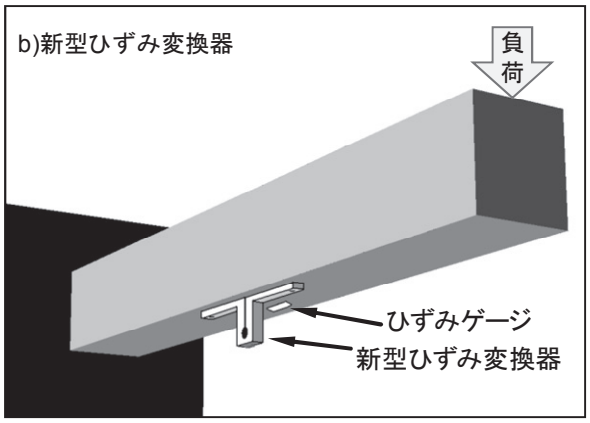


図5. 正面方向からの負荷に対するひずみ変換器の性能試験

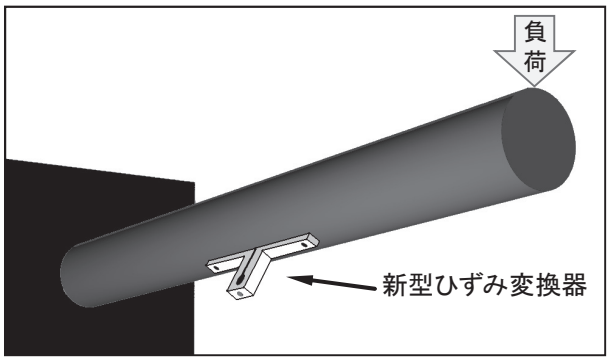


図6. 任意方向からの負荷に対するひずみ変換器の性能試験

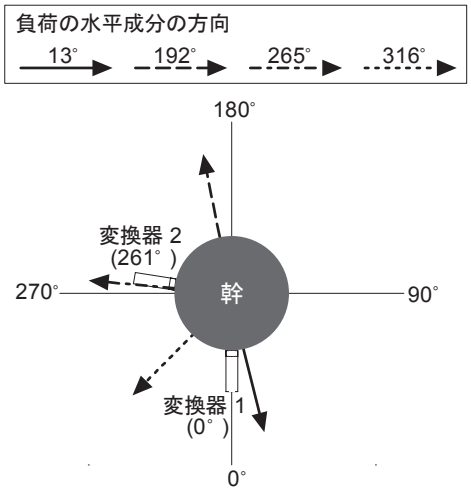


図7. 実物樹木の試験での負荷の水平成分の方向

器により変換されたひずみを一次式に代入することにより測定対象物のひずみを計算することができる．

ひずみ変換器により変換されたひずみの絶対値は，Moore 型ひずみ変換器と新型ひずみ変換器ともに，測定対象物のひずみの絶対値よりも小さくなったが，測定対象物のひずみが同程度である場合，新型ひずみ変換器により変換したひずみの絶対値はMoore型の約３倍の大きさとなった．大きい値に変換される方が測定の分解能は高くなるので，この点に関しては，Moore 型よりも新型ひずみ変換器の方が優れていると言える．

3.2　任意の直交方向への負荷に対する性能

Moore 型と新型ひずみ変換器どちらの場合も，負荷方向との成す角と変換されたひずみ（0 °でのひずみを 1, 180 °でのひずみを－1 としたひずみ相対値）の関係は 0°でのひずみを振幅とする余弦関数に概ね近いものであった（図９）．ひずみ変換器で変換されたひずみがひずみ変換器正面方向と負荷方向の成す角に対して余弦関数として変化するのであれば，変換されたひずみは負荷方向に生じるひずみの変換器正面方向成分を変換した値と見なせる．このことを用いれば，対象物に直交する面内の任意の方向から負荷がかかった場合であっても，測定対象物に直交する２つの方向にひずみ変換器を設置して測定を行ない，２つの方向のひずみをベクトルとして扱い合成することにより，負荷の方向と負荷方向のひずみの大きさを推定することができる．

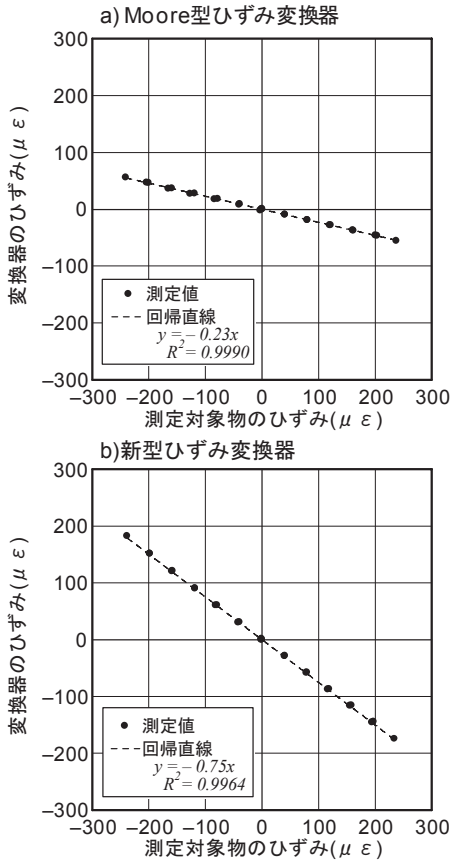


図8. 測定対象物のひずみとひずみ変換器で変換されたひずみの関係

Moore 型ひずみ変換器では，負荷方向との成す角の絶対値が同じであっても符号が異なる場合(図２)，変換されたひずみには差が見られ，符号が正の場合には余弦関数より小さい値に，符号が負の場合には余弦関数よりも大きい値になり，余弦関数との差はひずみ変換器の正面方向に対して直交する方向（角度の絶対値が 90 °）への負荷の場合に大きくなり，直交する方向から離れると小さくなる傾向があった（図９a，図 10）．角度の絶対値が同じでも符号が異なるとひずみ変換器のひずみに差が生じることは，Moore 型ひずみ変換器の正面形状が長さ方向に対し

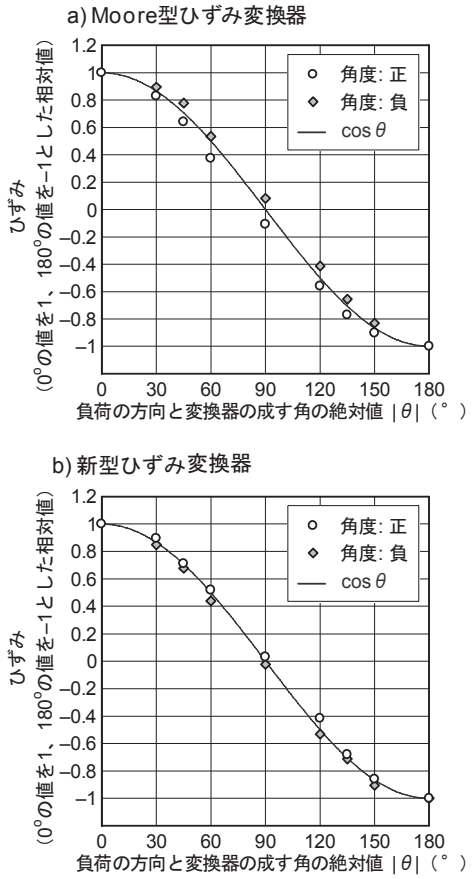


図9. ひずみ変換器と負荷方向のなす角とひずみ変換器のひずみの関係

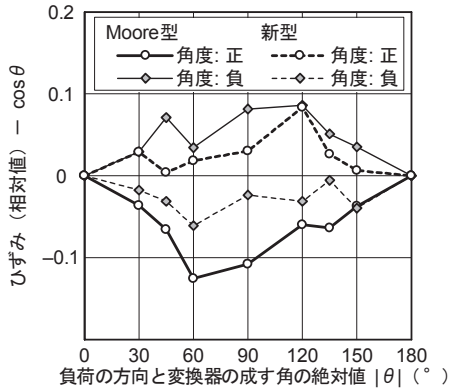


図10. ひずみ相対値と余弦曲線の関係

て対称でないことから予想されたことであった．

正面形状が長さ方向に対して対称である新型ひずみ変換器では，負荷方向との成す角の絶対値が同じであれば符号が異なっても（図４），ひずみ変換器のひずみには差が生じないはずであったが，実際には差が生じ，符号が正の場合には余弦曲線より大きい値に，符号が負の場合には余弦曲線よりも小さい値になった（図９b，図 10）．しかしながら，角度の符号の違いによるひずみの差，ひずみと余弦曲線との差はともに，Moore 型ひずみ変換器に比べて新型ひずみ変換器の方が小さく（図 10），それぞれの角度での変換ひずみと余弦関数の差を合計した値は，新型のものは Moore 型の半分以下であった．このことから，任意の直交方向から負荷を受ける測定対象物のひずみの測定には Moore 型に比べて新型ひずみ変換器の方が適していると言える．

測定対象物に対して２個のひずみ変換器を互いに直交する方向に向けて設置した場合を仮定して，それぞれのひずみ変換器による測定値には負荷の方向を変化させた場合の試験結果（図９）を用い，２つの方向のひずみをベクトルとして扱い合成することにより，測定対象物に対して直交するいろいろな方向から負荷をかけた場合のひずみの大きさと負荷の方向を推定した．実際の負荷方向と推定した負荷方向のとの差は，Moore 型ひずみ変換器の場合が５°程度，新型ひずみ変換器の場合が１°程度であり，新型の方が精度よく推定できていた（図 11）．推定したひずみベクトルの大きさは，Moore 型と新型とで明瞭な差は見られなかった．

3.3　Test3:実物の樹木での測定

互いに直交する水平２方向のひずみを測定できるように樹幹に設置した２個の新型ひずみ変換器により測定したひずみをベクトルとして扱い，２方向のひずみを合成することにより，負荷の水平成分の方向とその方向のひずみの大きさを推定した．

負荷の水平成分の方向を変化させても（図７），合成ひずみの大きさと負荷の大きさは概ね直線関係になった（図 12）．合成ひずみの方向は，負荷の水平成分の方向に対して概ね同じ方向になり，角度の差

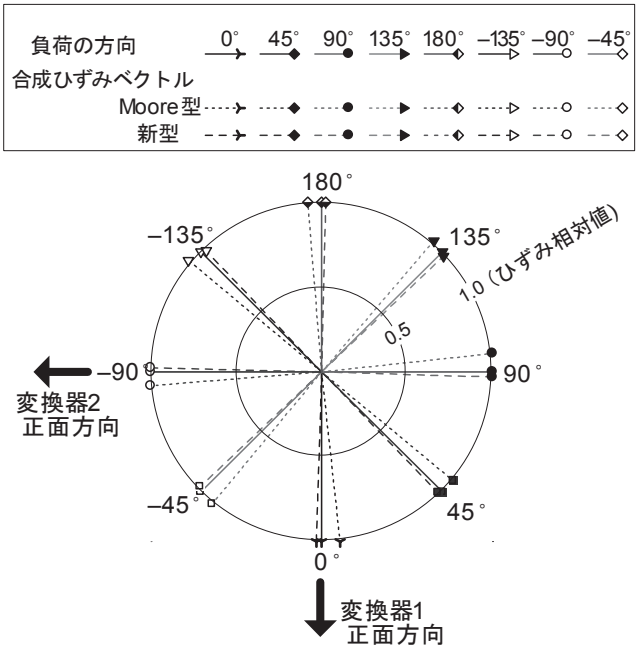


図11. 負荷の方向と合成ひずみベクトル

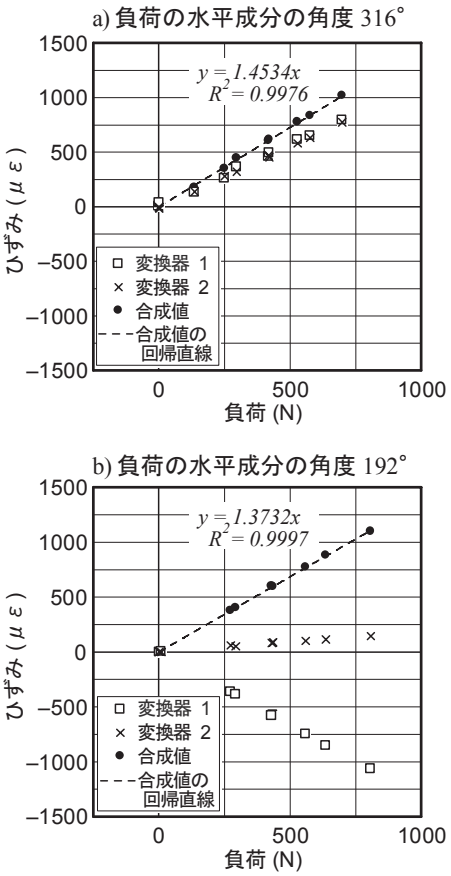


図12. 樹幹ひずみと負荷の関係

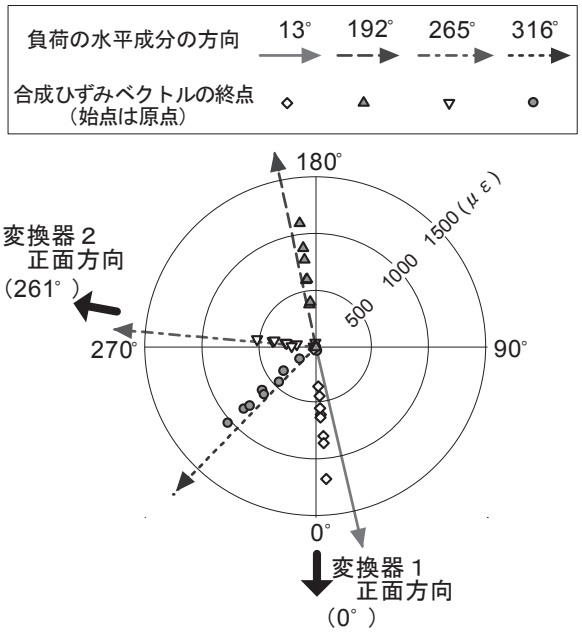


図13. 樹幹の合成ひずみと負荷の水平成分の方向

は最大でも 10 ° 未満であった（図 13）．変換器を設置した幹が真円でないこともあり，方向推定の精度については詳細に議論しないが，1 方位の角度が 22.5 ° となる 16 方位の区分で方位を推定することは可能であると考えられる．

4　結論

ひずみ変換器正面方向と負荷方向が成す角とひずみ変換器による測定値が概ね余弦曲線の関係になったことと，実物の樹木での試験結果から，２個のひずみ変換器により樹幹の水平２方向のひずみを測定し，その結果をベクトルとして扱い合成することにより，樹幹に対して任意の水平方向から負荷がかかる場合でも，負荷の方向とその方向のひずみの大きさを概ね推定することができることがわかった．

また，Moore 型ひずみ変換器に対して形状の対称性を改善した新型ひずみ変換器では，Moore 型ひずみ変換器に比べて，変換器正面方向と負荷方向が成す角とひずみ測定値の関係がより余弦曲線に近くすることができた．このことにより，任意の水平方向からの負荷を受けた場合の樹幹ひずみ測定の精度を高めることができた．

任意の水平方向からの負荷を受けた場合の樹幹ひずみの測定をより高い精度で行える新型ひずみ変換器は，負荷に対する樹木の動的反応の定量的理解に役立ち，ひいては林帯の効果的な管理に貢献し得る．このことは，海岸林のように厳しい物理的環境下にあり，防災的機能への要請が高く，林帯が効果的に管理されることが強く求められる林に対しては，意義深いことである．

引用文献

[1] Danielsen, F., Sorensen, M.K., Olwig, M.F., Selvam, V., Parish, F., Burgess, N.D., Hiraishi, T., Karunagaran, V.M., Ras musse n, M.S., Hansen, L.B., Quatro, A. and Suryadipurta, N., 2005. The Asian Tsunami: A protective role for coastal vegetation. SCIENCE. 310, pp. 643.

[2] Dunham, R.A. and Cameron, A.D., 2000. Crown, stem and wood properties of wind-damaged and undamaged Sitka spruce. For Ecol manage. 135, 73-81.

[3] Ennos, A.R., 1994. The biomechanics of root anchorage. Biomimetics 2, 129-137.

[4] Flesch, T.K. and Wilson, J.D., 1999. Wind and remnant tree sway in forest cutblock. Ⅱ. Relating measured tree sway to wind statics. Agric. For. Meteorol. 93, 243-258.

[5] Heisler, G.M. and Dewalle,　D.R., 1988. Effects of windbreak structure on wind flow. Agric. Ecosyst. Environ. 22/23, 41-69.

[6] Milne, R., 1991. Dynamics of swaying Picea sitchensis. Tree Physiol. 9, 383-399.

[7] Moore, J.R., Gardiner, B.A ., Blackburn, G.R.A., Brickman, A., Maguire, D.A, 2005. An inexpensive instrument to measure the dynamic response of standing trees to wind loading. Agri. For. Meteorol. 132, 78-83.

[8] White, R.G., White, M.F., Mayhead, G.J., 1976. Measurement of the motion of trees in two dimensions. Technical Report 86, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, 22pp.

〔受付　平成21 年 7 月16 日，　受理　平成 21 年 12 月 9 日〕