

沿岸樹木のパイプモデルを用いた表面積, 体積 評価法とその倒伏耐力

A METHOD BASED ON THE PIPE MODEL FOR ESTIMATING
THE SURFACE AREA AND VOLUME OF COASTAL FOREST TREES,
AND THEIR LODGING RESISTANCE

今井健太郎¹・鈴木明菜²

Kentaro IMAI and Akina SUZUKI

¹ 学生員 修(工) 秋田大学大学院工学資源学研究科博士後期課程 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

² 秋田大学工学資源学部 土木環境工学科 (同上)

A simplified evaluation method of the surface area and volume of coastal forest trees is proposed by using the Pipe Model based on the physiology of the vegetation. When inundation depth is higher than the tree height, the surface area and volume of tree evaluated by this method were simply determined by the height and diameter of tree. In addition, coastal forest trees' lodging resistance to a reproduced inundated flow by tsunami was investigated. The result of examination was equivalent or smaller than conventional values used for river channels. A quantitative evaluation of coastal forest trees' lodging resistance to tsunami was suggested.

Key Words : coastal forest trees, the pipe model, lodging resistance, tsunami, inundated flow

1. はじめに

2004 年 7 月の新潟・福井の洪水災害では, 増水による堤防決壊は勿論のこと, 流木による被害が顕著であった。河川計画において, 親水性を高めるために河道内に樹木を植える例はあるが, こういった大洪水がひとたび発生すると様々な被害を及ぼす。例えば, 福井市美山町の落橋の引き金となったのは, 流木化した河川沿岸樹木を中心とした漂流物が橋脚に滞留して河道を閉塞し, 堰上げが生じたためと考えられる。一方, 海岸域では津波からの面的な防御策に沿岸林を利用できる可能性 (例えば, 松富ら¹⁾; 今井ら²⁾; 原田ら³⁾) があり, 事実, 日本海中部地震津波⁴⁾では津波の減勢効果, 漂流物の阻止効果などの実例がある。

沿岸林を津波減災に役立てる場合, 津波に対する沿岸樹木の倒伏耐力を検討する必要がある。河道内樹木についての倒伏限界については参考文献⁵⁾や渡邊ら⁶⁾によって詳細に調べられているが, 沿岸林に適応出来るかは不明である。

一方, 剛な円柱物体に適用される流体力算定式としては, 式(1)で表現される Morison 式⁷⁾がある。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho C_D u |u| dh + \frac{\pi}{4} \rho C_M d^2 h \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

ここで, ρ は水の密度, u は流速, d は円柱物体の直径, h は水深, C_D は抗力係数, C_M は質量係数である。式(1)中には対象物体の投影面積, 体積が含まれ, 的確に流体力を算定するためには諸係数や流速を精度よく評価することは勿論のこと, 対象物体の投影面積, 体積についても精度良く算定する必要がある。しかし, 樹木の表面積や体積を評価するには伐採し詳細に調べる必要があり, 未だ大変な労力を必要とするのが現状である。

そこで, 本研究では植物生態学に基づいたパイプモデル理論^{8), 9)}を利用して樹木の表面積や体積の概算式を提案し, その一方で秋田県沿岸の防備林 (対象を黒松に限定) について, 参考文献⁵⁾の手法に従って倒伏耐力を調査し, 津波氾濫流に対する沿岸樹木の倒伏耐力を定量的に評価することを目的としている。

2. 沿岸樹木の表面積・体積評価法

(1) パイプモデルの概念と定式化

一般樹木や植生において, 一定量の葉を力学的かつ, 生理学的 (樹木の生理的連続条件) に支え, かつ, 一定の太さを持つ枝, 幹のパイプが地面に連続して接続される構造をパイプモデルという。樹木等, 植物の構造特性をパイプモデル理論によって説明した文献としては, 篠崎ら⁸⁾, 大島ら⁹⁾のものが詳しい。パイプモデルの概念

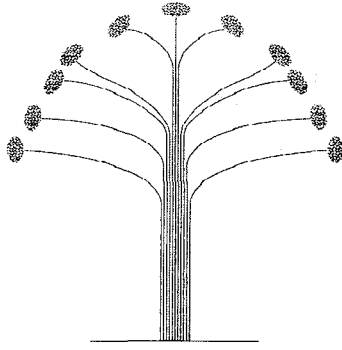


図-1 パイプモデルの概念図

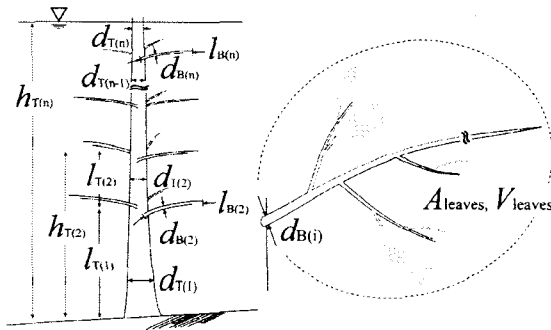


図-2 諸記号の定義

図を図-1に示す。図-2は樹木についての諸記号の定義を示す。図中、下添え字*i*はセグメント番号を示している。 $d_{T(i)}$ は樹幹部の直径、 $d_{B(i)}$ は枝部直径、 $l_{T(i)}$ は各セグメント間の幹長さ、 $l_{B(i)}$ は枝長さであり、 $h_{T(i)}$ は根元から*i*番目までの高さ、 $h_{T(n)}$ は浸水深である。各セグメントの定義としては、幹からの枝分岐が比較的多く集まっている箇所の間を選び定めた。式の展開において、より簡便化を図るため、同じセグメント内の枝直径は同一と仮定し、幹から直接分岐する枝のみ考慮に入れる。それより上の階層で分岐した枝の表面積や体積は実測による結果から近似的に反映させる。パイプモデル理論によると、各幹枝部における断面積は式(2)の関係がある。

$$\begin{aligned} \frac{\pi d_{T(1)}^2}{4} &= \frac{\pi d_{T(2)}^2}{4} + \sum \frac{\pi d_{B(2)}^2}{4} \\ &\vdots \\ \frac{\pi d_{T(i-1)}^2}{4} &= \frac{\pi d_{T(i)}^2}{4} + \sum \frac{\pi d_{B(i)}^2}{4} \end{aligned} \quad (2)$$

この関係を検証するために、実際の黒松の育成状況を詳細に調べた。黒松の育成状況を表-1に示す。 H は樹高、 D は幹の平均直径、 N は樹木中の枝分岐点の合計である。図-3は各幹断面積及び幹・枝葉を含んだ換算断面積（測定体積/各セグメントの長さ）と各樹高の関係を示す。幹部分については各セグメントの平均直径を用い、枝葉についてはメスシリンダーを用いて体積を測定した。図か

表-1 黒松の育成状況

	case-1	case-2	case-3	case-4
H (cm)	142.3	143.2	154.6	197.1
D (cm)	1.26	1.63	2.30	4.08
N	7	6	9	9

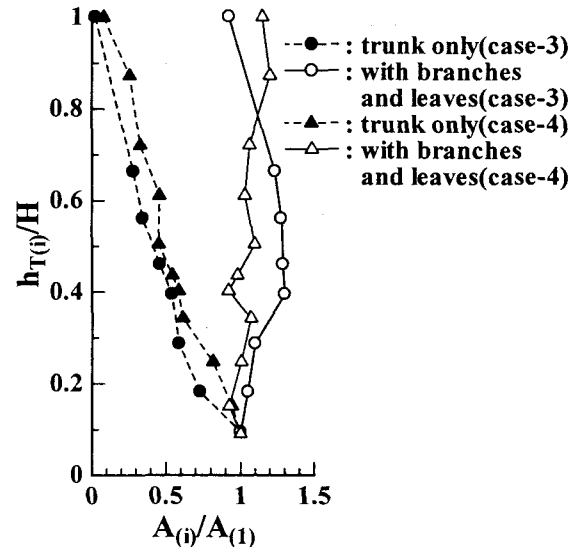


図-3 幹断面積及び幹・枝葉を含んだ換算断面積と各樹高の関係

ら、幹と枝葉を含めた換算断面積は高さ方向にはほぼ一定と見てとれ、式(2)を保証する結果となった。式(2)から式(3)を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\pi d_{T(1)}^2}{4} &= \frac{\pi d_{T(n)}^2}{4} + \sum \frac{\pi d_{B(2)}^2}{4} + \sum \frac{\pi d_{B(3)}^2}{4} + \dots + \sum \frac{\pi d_{B(n)}^2}{4} \\ &= \frac{\pi d_{T(n)}^2}{4} + \sum_{i=2}^n \left(J_{(i)} \cdot \frac{\pi d_{B(i)}^2}{4} \right) \\ &\cong \frac{\pi d_{T(n)}^2}{4} + (n-1) \cdot J \cdot \frac{\pi d_B^2}{4} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $J_{(i)}$ は各セグメントにおける枝分岐数、 J は平均枝分岐数、 d_B は平均枝直径である。 $\alpha \cong d_B/d_{T(1)}$ とすると、式(3)から次式の関係を得る。

$$\begin{aligned} (n-1) \cdot J &= \frac{d_{T(1)}^2 - d_{T(n)}^2}{d_B^2} \\ &= \frac{d_{T(1)}^2 - d_{T(n)}^2}{(\alpha \cdot d_{T(1)})^2} \\ &= \frac{1}{\alpha^2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{d_{T(n)}}{d_{T(1)}} \right)^2 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

図-4に実測から得た $d_{B(i)}/d_{T(1)}$ と $h_{T(i)}/H$ の関係を示す。実際の樹木を見てみると、地上から離れるに従い枝の長さは短く、枝直径も小さくなるものであるが、本実測の範囲では $d_{B(i)}/d_{T(1)}$ の $h_{T(i)}/H$ への依存性は確認できなかった。

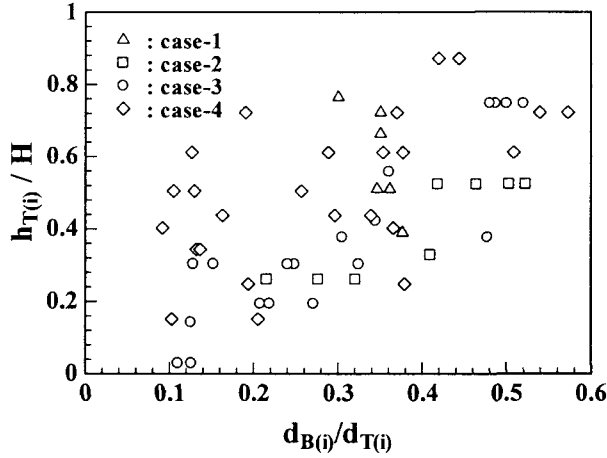


図-4 $d_{B(i)}/d_{T(i)}$ と $h_{T(i)}/H$ の関係

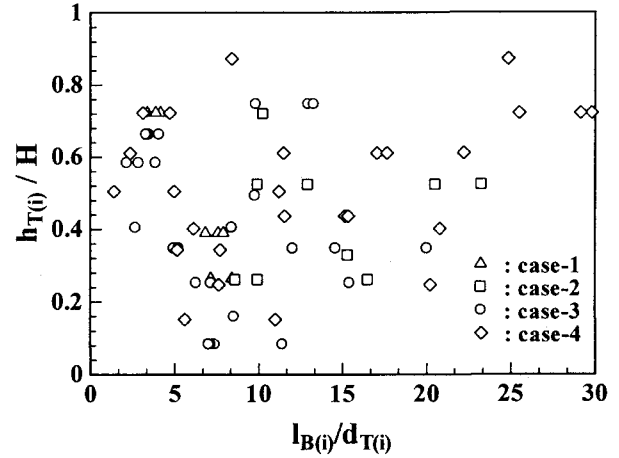


図-5 $l_{B(i)}/d_{T(i)}$ と $h_{T(i)}/H$ の関係

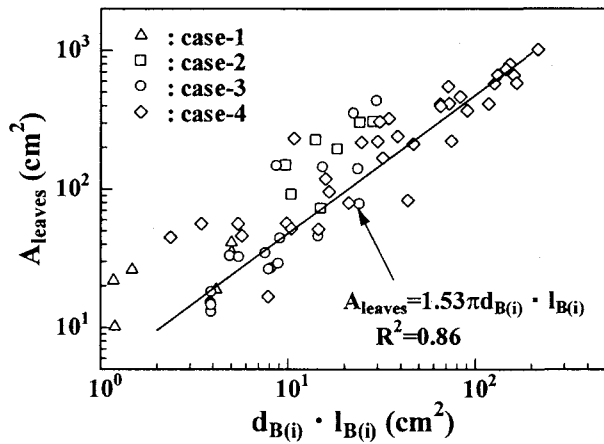


図-6 $d_{B(i)} \cdot l_{B(i)}$ と A_{leaves} の関係

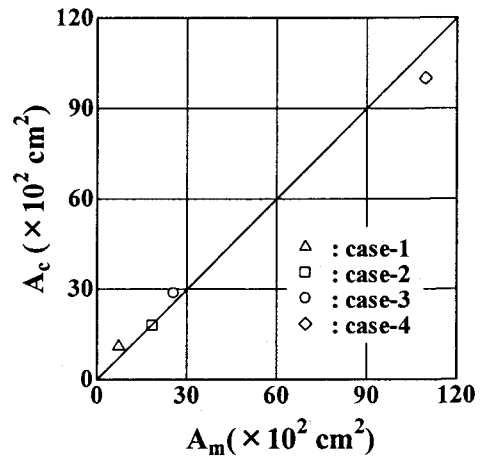


図-7 A_m と A_c の比較

た。よって、式の展開を簡便にするために α を平均値で与えることにし、 $\alpha \cong d_{B(i)}/d_{T(i)} \cong 0.3$ とした。

(1) 沿岸樹木（黒松）の表面積

流体力評価を行う上で、式(1)の第1項である抗力は非常に重要である。抗力を評価する時、物体の形状は投影面積で代表されるが、樹木は幹部、枝部そして葉部と複雑な構造を有するため、投影面積を評価するには伐採を行う等、大変な労力を必要とする。そこで、パイプモデル理論を利用して樹木表面積の概算式を導く。樹木が円柱形状で構成されると仮定すれば、投影面積への変換は容易である。樹木の葉部を除いた表面積は式(5)で近似される。

$$\begin{aligned} A &= \pi d_{(1)} \cdot l_{T(1)} + \pi d_{T(2)} \cdot l_{T(2)} + \cdots + \pi d_{T(n)} \cdot l_{T(n)} \\ &\quad + \sum \pi d_{B(2)} \cdot l_{B(2)} + \cdots + \sum \pi d_{B(n)} \cdot l_{B(n)} \\ &\cong \sum_{i=1}^n \pi d_{T(i)} \cdot l_{T(i)} + \sum_{i=2}^n (\pi \cdot J_{(i)} \cdot d_{B(i)} \cdot l_{B(i)}) \\ &\cong \sum_{i=1}^n \pi d_{T(i)} \cdot l_{T(i)} + (n-1) \cdot J \cdot \pi d_B \cdot l_{B(i)} \end{aligned} \quad (5)$$

各枝長さと幹直径を関連付ければ式はより簡略化される。そこで、 $l_{B(i)}/d_{T(i)}$ と $h_{T(i)}/H$ について調べた結果が図-5である。図から、本研究の条件では樹高と枝長さの間には特徴的な関係は見出せなかった。よってこの関係も α と同様、平均値で与えることにする。ここで幹直径枝長比を β と定義すると、平均値として $\beta \cong l_{B(i)}/d_{T(i)} \cong 12.0$ を得る。

一方、枝直径、枝長さの積 $d_{B(i)} \cdot l_{B(i)}$ と枝葉表面積 A_{leaves} の関係を図-6に示す。葉部について、計算に用いた針葉部一本の形状は実測によって得られた値の平均で代表させ、長さ 6.75cm、直径 0.77mm とした。 $d_{B(i)} \cdot l_{B(i)}$ と A_{leaves} は、多少のばらつきはあるが線形関係を示し、最小自乗法により式(6)の関係を得た。

$$A_{leaves} = 1.53\pi d_{B(i)} \cdot l_{B(i)} \quad (6)$$

この結果を用いる場合、より平均的な値を採用することになるが、上限を採用すれば倒伏の危険性が増え、下限を採用すれば抵抗を過小評価してしまう可能性があるため妥当な選択であると判断する。よって、枝葉部の表面積を式(6)により考慮して式(7)を得る。

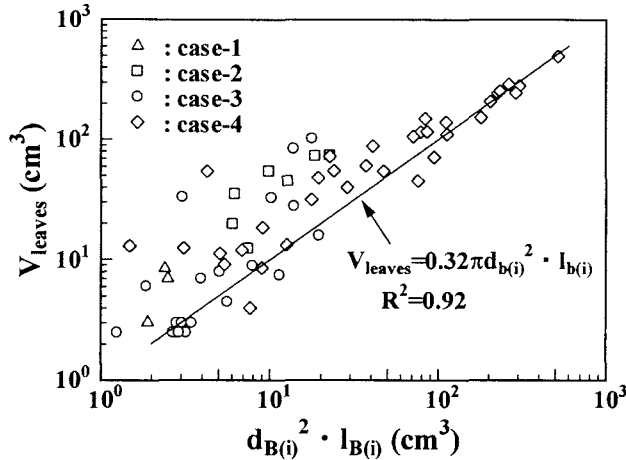


図-8 $d_{B(i)}^2 \cdot l_{B(i)}$ と V_{leaves} の関係

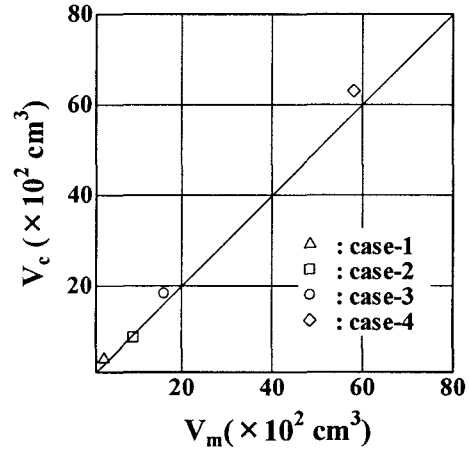


図-9 V_m と V_c の比較

$$A \cong \sum_{i=1}^n \pi d_{T(i)} \cdot l_{T(i)} + 1.53\pi \cdot \frac{d_B \cdot l_{B(i)}}{\alpha^2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{d_{T(n)}}{d_{T(i)}} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

より簡便性を考え、 $d_{T(i)}$ は胸高直径 D_c を用い、 α 、 β から式(8)を得る。

$$\begin{aligned} A &\cong \pi D_c h_{T(n)} + 1.53\pi \cdot \frac{(d_{T(i)}^2 - d_{T(n)}^2)}{d_{B(i)}} \cdot l_{B(i)} \\ &\cong \pi D_c h_{T(n)} + 1.53\pi \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot (D_c^2 - d_{T(n)}^2) \\ &\cong \pi D_c h_{T(n)} + 61.2\pi \cdot (D_c^2 - d_{T(n)}^2) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、浸水深が樹高を越える場合はより簡略化され、式(9)を得る。

$$A \cong \pi D_c H + 61.2\pi D_c^2 \quad (9)$$

図-7 は実測と式(9)により概算された表面積の比較である。ここで下添え字 m は実測値を、c は式(9)により概算された表面積を示す。ここでの D_c は測定した樹木が小さいことから、各ケースの枝下直径を与えた。図から、両者の整合は良いといえる。しかし、これは本研究における実測の範囲内であるので、さらに実測値を蓄積し、 α 、 β の吟味が必要と考えられる。

(2) 沿岸樹木（黒松）の体積

体積についてもパイプモデル理論を用いて定式化していく。幹及び枝部を円柱形状と仮定すると、式(10)を得る。

$$V \cong \sum_{i=1}^n \frac{\pi d_{T(i)}^2}{4} \cdot l_{T(i)} + J \cdot \sum_{i=2}^n \frac{\pi d_{B(i)}^2}{4} \cdot l_{B(i)} \quad (10)$$

体積の評価を行うためには、葉部の体積と枝断面積に何らかの関係を見出す必要がある。そこで、枝断面

積と枝長さの積である $d_{B(i)}^2 \cdot l_{B(i)}$ と各枝葉部体積 V_{leaves} の関係を図-8 に示す。多少のばらつきはあるが、 $d_{B(i)}^2 \cdot l_{B(i)}$ と V_{leaves} の間には線形関係が確認された。このような関係は生態学的に考えると、葉体積とそれを支える枝断面積の間に関係があり、大量の葉（あるいは果実などを含む）を支えるためには、それに対応した枝（茎）の強度（断面積の増大）が必要であることを示している。

$d_{B(i)}^2 \cdot l_{B(i)}$ と V_{leaves} の関係式を最小自乗法により求めた結果が式(11)である。

$$V_{leaves} = 0.32\pi d_{B(i)}^2 \cdot l_{B(i)} \quad (11)$$

式(4)、(11)と α 、 β を用いると、体積は若干の近似を施したのち、式(10)は式(12)に変形される。

$$\begin{aligned} V &\cong \frac{\pi D_c^2}{4} \cdot h_{T(n)} + \frac{0.32\pi}{4} \cdot (n-1) \cdot J \cdot d_B^2 \cdot l_{B(i)} \\ &\cong \frac{\pi D_c^2}{4} \cdot h_{T(n)} + \frac{0.32\pi}{\alpha^2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{d_{T(n)}}{d_{T(i)}} \right)^2 \right\} \cdot d_B^2 \cdot l_{B(i)} \\ &\cong \frac{\pi D_c^2}{4} \cdot h_{T(n)} + \frac{0.32\pi}{\alpha^2} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{d_{T(n)}}{D_c} \right)^2 \right\} \cdot (\alpha D_c^2) \cdot \beta D_c \\ &= \frac{\pi D_c^2}{4} \cdot h_{T(n)} + 0.32\pi \cdot \frac{\beta}{\alpha} \cdot (D_c^3 - d_{T(n)}^2 \cdot D_c) \\ &= \frac{\pi D_c}{4} \{ D_c h_{T(n)} + 51.2(D_c^2 - d_{T(n)}^2) \} \end{aligned} \quad (12)$$

浸水深が樹高を越える場合では次式となる。

$$V \cong \frac{\pi D_c^2}{4} (H + 51.2 D_c) \quad (13)$$

図-9 は実測と式(13)により概算された体積の比較である。図中の凡例や、 D_c の取り扱いとは表面積と同様である。図から、両者の整合は良好であるが、表面積と同様、本研究における実測の範囲内であるので、さらなる実測値の蓄積が必要である。

表-2 倒伏試験を実施した樹木の各諸量

場所	調査日	Dc (cm)	H (m)	M (kN・m)	κ (%)	場所	調査日	Dc (cm)	H (m)	M (kN・m)	κ (%)
天王海岸	04/6/1	13.2	6.6	7.06	0.27	釜谷海岸	04/9/12	6.6	6.3	1.53	0.23
天王海岸	04/6/1	7.3	5.5	4.35	0.27	釜谷海岸	04/9/12	8.1	6.0	5.88	0.46
天王海岸	04/6/1	9.4	5.7	4.00	0.32	釜谷海岸	04/9/12	10.2	8.0	7.41	0.46
天王海岸	04/6/1	9.5	7.4	2.47	0.32	釜谷海岸	04/9/15	9.5	8.5	5.17	0.54
天王海岸	04/6/1	9.5	5.8	5.41	0.22	釜谷海岸	04/9/15	11.2	7.6	7.29	0.54
天王海岸	04/6/1	10.8	8.0	8.82	0.22	釜谷海岸	04/9/15	13.1	11.5	10.58	0.49
天王海岸	04/6/13	8.6	5.8	4.70	0.47	峰浜海岸	04/9/15	9.0	6.5	3.53	0.44
天王海岸	04/6/13	6.5	7.3	2.35	0.47	峰浜海岸	04/9/15	10.5	7.2	5.29	0.44
釜谷海岸	04/9/12	8.6	6.2	2.82	0.23	峰浜海岸	04/9/15	7.6	5.5	2.35	0.40

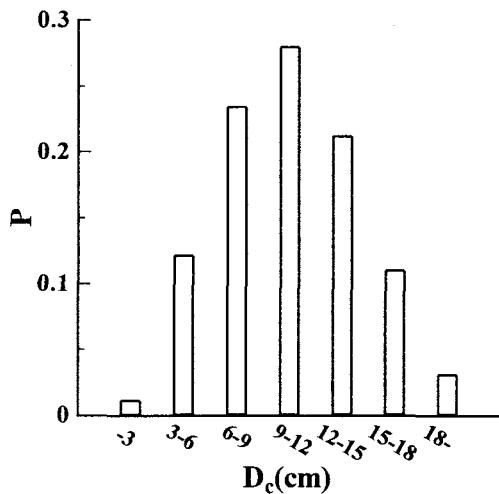


図-10 黒松の胸高直径 D_c と頻度 P

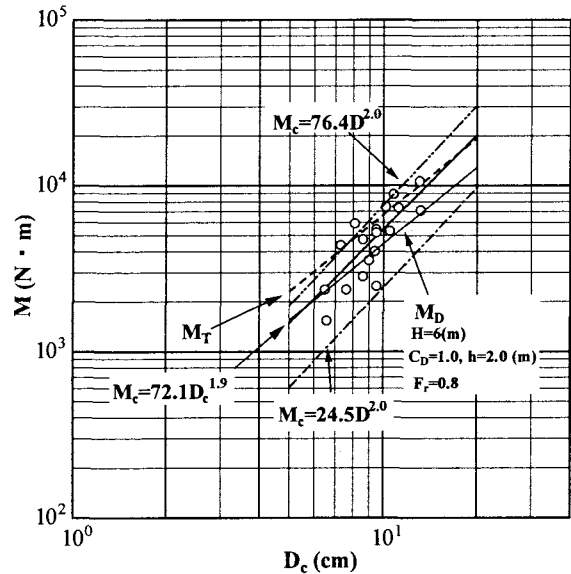


図-11 胸高直径 D_c と倒伏モーメント M の関係

3. 沿岸防備林の特性と沿岸樹木の倒伏耐力

(1) 沿岸防備林の特性とその育成状況

沿岸樹木を津波災害に役立てるためには、その育成状況を把握することが必要である。そこで、主に樹木の本数、胸高直径、そして樹木密度 κ (単位面積当たりの総樹木断面積/単位面積) について実地調査を行った。調査場所については、過去の事例から津波遡上が確認された場所や、防備林が秋田県によって整備されている箇所を選定した。調査場所の詳細としては、秋田県南秋田郡天王海岸、同県山本郡釜谷海岸、同県山本郡峰浜海岸である。釜谷海岸と峰浜海岸は砂丘から連続的に防備林に接続しており、8m の津波遡上高が確認されている⁴⁾。

表-2 は倒伏試験を実施した樹木の各諸量と周辺環境を示したものである。 κ はおよそ 0.2~0.5% 程度であり、表には示していないが土壌はすべて砂地盤である。渡邊ら⁹⁾ は土中含水比や根鉢表面積が倒伏限界モーメントに及ぼす影響を指摘している。本研究で扱った被試験樹木根元の土壌性質は砂質であり、その含水比は 15~25% 程度であった。また、その比重の平均値は 2.64 であった。勿論、含水比が倒伏耐力に関係するものと

思われるが、砂地盤の場合、含水比よりも砂の拘束条件が重要となる¹⁰⁾ と考え、本研究では検討外とした。また、根鉢表面積は胸高直径に関係があると考え、調査の検討外とした。

調査現場での黒松の胸高直径 D_c と頻度 P を図-10 に示す。ここでの頻度とは、測定地域の全樹木本数に対する、ある直径区間における本数の割合を示す。図から、胸高直径は 6~15cm 程度が非常に多く、全体の 8 割弱を占めていた。また、調査地点における樹木の胸高直径の中央値は 10.6cm であった。首藤の報告¹¹⁾ では、沿岸林樹木の胸高直径の中央値は 13cm であり、それと比べれば若干小さいものであるが、本研究で調査した地点は首藤の実測結果¹¹⁾ に近い沿岸林であるといえる。

(2) 沿岸樹木の倒伏耐力

河道内樹木については、土木研究所や渡邊らによって詳細に樹木の倒伏試験^{5),6)} が行われている。しかし、沿岸の樹木については、その結果が適用できるかは不明である。そこで本研究では秋田県沿岸における防備

林について、参考文献⁵⁾にある試験方法に従って試験を行った。調査方法は、樹木の根元から胸高位置である1.2mを作用点とし、反力点の中間にチェーン・ブロックと荷重計を取り付け、荷重を架けていき引き倒し荷重を測定した。倒伏の基準としては根折れの状態とした。すなわち、載荷しても荷重が増えないが変位量は増加する状態を倒伏と判定した。図-11は胸高直径 D_c と倒伏モーメント M の関係である。なお、比較のために国土交通省の回帰式($M_c=76.4D_c^{2.0}$)とその下限式($M_c=24.5D_c^{2.0}$)、本調査により得られた回帰式($M_c=72.1D_c^{1.9}$)も併記した。図から、我々が実施した試験結果は若干小さいが、国土交通省提案の回帰式と下限式の範囲内に収まる結果となった。これは河道内樹木における倒伏限界モーメントの回帰式が沿岸樹木にも適用できることを示している。図中の M_D は津波による樹木に作用する流体力のうち、抗力のみによる倒伏モーメントを、 M_T は今井ら²⁾によって見積もられた流体力の総和(抗力、慣性力、線形造波抵抗力)による倒伏モーメントである。津波の流況に関して、浸水深については $h=2\text{m}$ とし、松富ら¹²⁾の津波事後における現地調査で得られた結果を参考にフルード数は $F_r=0.8$ を想定した。想定した対象樹木は樹高を6mとし、胸高直径を4~20cmの間を変化させ、投影面積については式(8)から概算した表面積を π で除したものを採用した。図より、秋田沿岸の樹木では倒伏の危険性が生じるのは津波浸水深が2m程度であることが判る。このように枝葉の投影面積の概算式と、樹木の倒伏限界モーメント評価回帰式により、沿岸防備林による津波減災効果とその限界を簡便に判定することが可能となる。

4. おわりに

本研究で得られた主な結論は以下である。

- 1) パイプモデルを用いて、沿岸域に生息する黒松のモデル化を行った。
- 2) 本研究の範囲では、式(8)、(12)を用いることにより沿岸樹木の表面積と体積の概算が可能である。
- 3) 津波の浸水深が樹高を越える場合、表面積と体積は樹高と胸高直径のみで概算が可能である。
- 4) 河川内樹木における国土交通省提案の倒伏モーメント回帰式は、沿岸樹木にも適用可能であることを確認した。
- 5) 式(8)、(12)と国土交通省提案の倒伏モーメント回帰式により、防備林による津波の減災効果とその限界を簡便かつ、定量的に判定することが可能となる。

今後の課題としては、ここで提案した概算式は本研究における実測の範囲内であるので、今後も実測値を集め、式の適用範囲を拡張させることが挙げられる。

謝辞： 本研究を行うにあたり、秋田大学工学資源学部松富英夫助教授、高橋智幸助教授には多くの助言を賜った。秋田県秋田地域振興局の小坂琢也氏、秋田県山本地域振興局の三浦佑介氏には倒伏試験の許可だけでなく、防備林について様々な情報を提供して頂いた。また、本学卒業研究生、栗塚一範君、佐藤健君、高橋心平君、富岡展行君には樹木の倒伏試験を遂行するにあたり、多大なる助力を得た。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 松富英夫、穂積拓哉、今井健太郎：砂嘴植生域を越える津波の基礎水理、海岸工学論文集、第48巻、pp.316-320, 2001.
- 2) 今井健太郎、松富英夫、高橋智幸：津波氾濫流の植生に作用する各種流体力、海岸工学論文集、第50巻、pp.276-280, 2003.
- 3) 原田賢治、今村文彦：防潮林による津波減衰効果の評価と減災の為の利用の可能性、海岸工学論文集、第50巻、pp.341-345, 2003.
- 4) 土木学会編著：1983年日本海中部地震震害調査報告書、土木学会、pp.112-126, 1986.
- 5) リバーフロント整備センター 編集：河川における樹木管理の手引き、山海堂、pp.154-171, 1999.
- 6) 渡邊康玄、市川嘉輝、井出康郎：洪水時における河道内樹木の倒伏限界、水工学論文集、第40巻、pp.169-174, 1996.
- 7) Morison, J.R., M. P. O'Brien, J. W. Johnson and S. A. Schaaf: The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Transaction, AIME, Vol. 189, pp.149-154. 1950.
- 8) Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, L., and Kira, T.: A quantitative analysis of plant form - The pipe model theory; 1 Basic analysis. Japanese Journal of Ecology, Vol.14, pp.97-105, 1964.
- 9) Oohata, S., and Shinozaki, K.: A statical model of plant form - further analysis of the pipe model theory. Japanese Journal of Ecology, Vol. 29, pp.323-335. 1979.
- 10) 河上房義著：土質力学、pp.127-132. 1982.
- 11) 首藤伸夫：防潮林の津波に対する効果と限界、海岸工学講演会論文集、第32巻、pp.465-469, 1985.
- 12) Matsumoto, H., Y. Kawata, N. Shuto, Y. Tsuji, K. Fujima, F. Imamura, M. Matsuyama, T. Takahashi, N. Maki and S. S. Han: Flow Strength on Land and Damage of the 1998 Papua New Guinea Tsunami, Advances in Natural and Technological Hazards Research, Vol.18, Kluwer Academic Publishers, pp.179-195, 2001.

(2004. 9. 30 受付)