

耐風速に着目した倒木リスク定量評価手法の開発

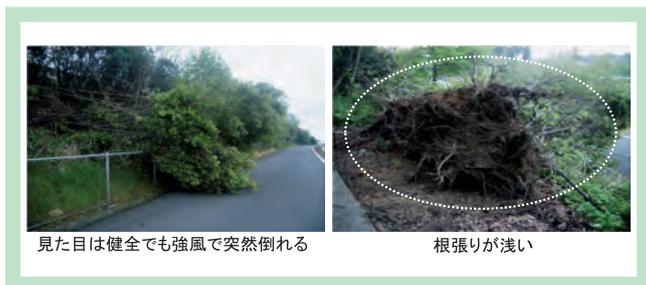
西日本高速道路エンジニアリング四国(株) 技術本部 技術部 山下民岐子
橋爪 謙治

抄 録

樹木点検では、樹木の枯損や衰弱などを目視や触診しているが、目に見えない腐朽等による倒木リスクを判断するのは非常に困難である。そこで、倒木が懸念される樹木のスクリーニングに活用するため、樹木に水平方向の荷重をかけた際の変位量を計測し、その傾向を分析した。本報文は、樹木を引っ張り、その変位量と荷重から強風による倒木リスクを推定する手法を提案するものである。

1 — はじめに

近年、強風や突風による倒木事象が第三者被害に至るケースが頻発している。高速道路ではのり面や休憩施設など広範囲に渡り植樹されており、点検対象は膨大である。枯損、衰弱などは目視により点検できるが、一見健全でも、根の生育不良（写真1）などで生じる根返りなどの倒木リスクを判断するのは難しい。また、倒木の引き金となる台風などによる強風には地域性があり、仮に同じ耐風速を有する樹木であっても、地域ごとに倒木リスクは異なる。本報文では、四国管内の連絡施設及び休憩施設（以下、「連絡等施設」という）における過去のピンポイント気象情報から、最大風速の履歴を整理することで強風の地域性を整理し、樹木の引っ張りによる耐風速推定と組み合わせることで、地域性を加味した定量的かつ効率的な倒木リスク評価手法の活用を提案するものである。



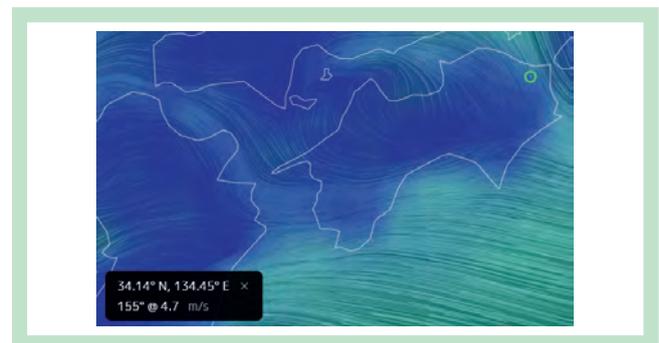
●写真1 — 根返りによる倒木事例

2 — 四国管内の風速における地域性

日本3大局地風の一つであるやまじ風は、愛媛県四国中央市を中心に吹く強風として有名である。

四国管内でも風の強さに地域性があることから、点検や伐採の優先度に活用できないか検討を行った。

本報文では、緯度経度からピンポイントの3時間ごとの最大風速を得ることができるウェブサイト「earth」¹⁾を利用した。図1のように、風速風向をアニメーションで表示可能で、緯度経度を指定、または画面上でクリックすると、過去の気象情報を1時間または3時間ごとに取得できる。

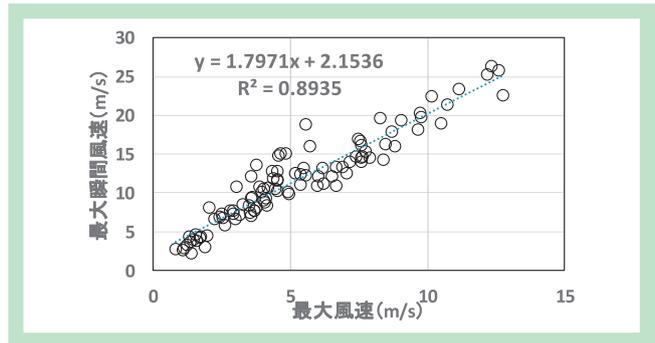


●図1 — earthサイト画面

取得可能な過去8年間の最大風速（10分間の平均風速の最大値）を整理したが、樹木の倒木に影響するのは、最大瞬間風速（3秒間の平均風速の最大値）であるため、最大風速から、最大瞬間風速を推定した。推定手法の1つに突風率（ガストファク

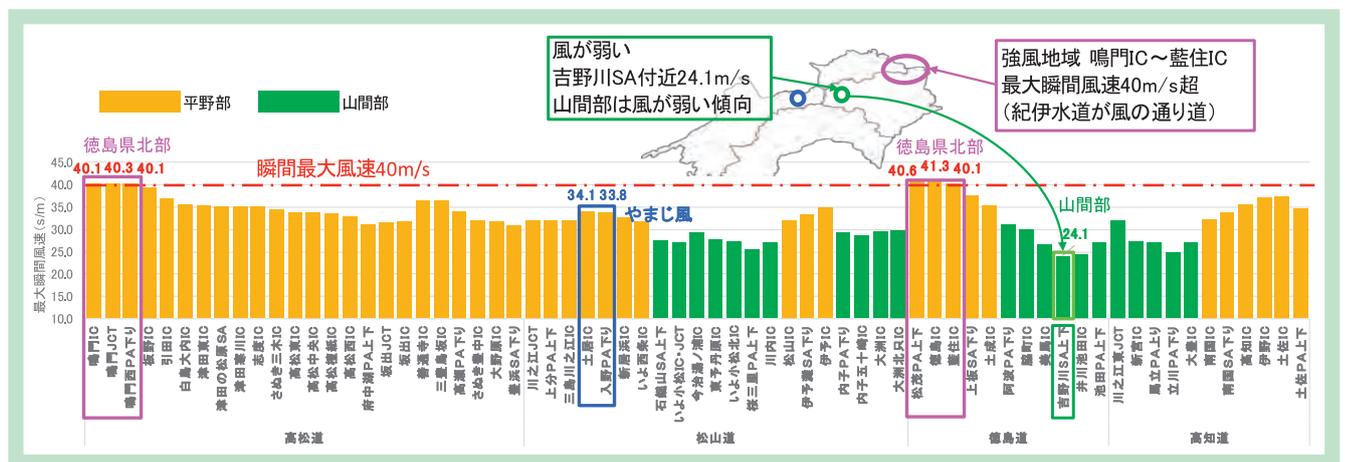
ター)²⁾がある。突風率は最大風速から最大瞬間風速を求める目安であり1.5～2倍程度が一般的とされているが、計算に用いる地表面粗度区分に山間部が含まれないため、四国地方の代表的な突風率を、高松、松山、高知、徳島の各地方気象台が観測した最大風速と最大瞬間風速の関係から求めることとした。

図2に近年最も強風であった2021年8月9日の台風通過時の最大風速と最大瞬間風速を示す。図のとおり寄与率0.8935と高い相関が得られたため、この関係式を用いて最大瞬間風速を推定した。



●図2——最大風速と最大瞬間風速の関係

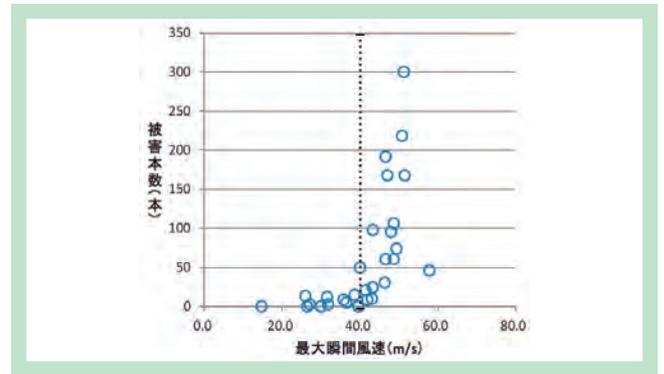
図3に、四国管内の高速道路の各連絡等施設における過去8年間の最大瞬間風速の推定値を示す。山間部の風は弱い傾向が見られる。やまじ風で有名な土居IC周辺の風は強いが、最も風が強いのは、紀伊水道が風の通り道となる徳島県北部周辺であり台風の影響が大きいことが明らかになった。最も風が強い徳島ICと、最も弱い吉野川SAを比較すると、その差は約1.7倍となり、地域によってかなりの開きがあることが分かる。一般的に、風速30 m/sを超えると、根が張っていない木が倒れ始めるとされており、図4に示す沖縄県の倒木樹木の被害本数と最大瞬間風速の関係のとおり、最大瞬間風速が40m/s



●図3——連絡等施設における最大瞬間風速（2014年～2021年）

を超えるると健全な樹木であっても、被害本数が大幅に増える傾向となる³⁾。このことから四国では、風による山間部の倒木リスクは非常に低く、最も注意を要するのは、徳島県北部地域であることが明らかになった。

この地域性を念頭に点検や伐採を行えば、効率的に倒木リスクを減らすことが可能になると考える。



●図4——倒木樹木と最大瞬間風速（沖縄県の例）

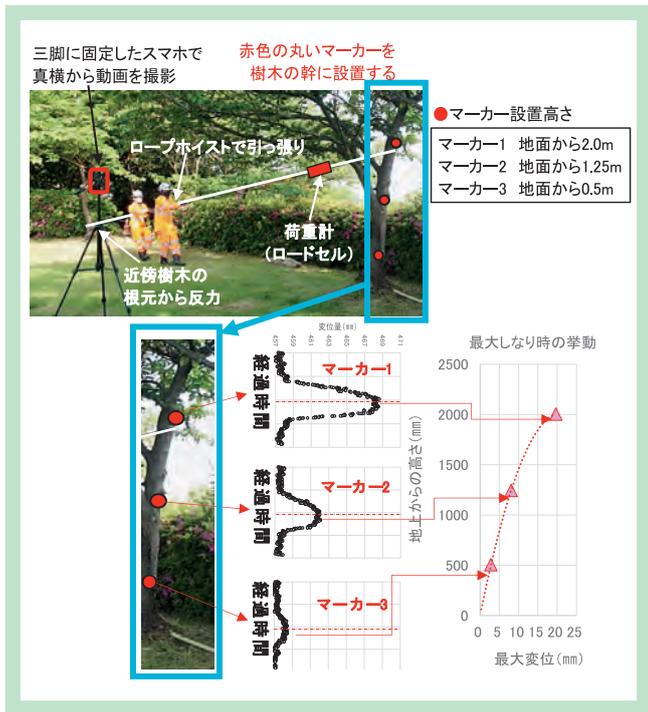
3——倒木リスクの定量評価手法

前項の地域性と樹木の耐風速を組み合わせることで倒木リスクをより定量的、客観的に評価できれば倒木リスクをより定量的、客観的に評価できる。そこで、樹木の引っ張りによる耐風速の推定と、樹種ごとの傾向について分析を行い、樹木の安全率を用いて地域性を考慮したリスク木のスクリーニングを実施した。

3.1 現場における引張試験方法

連絡等施設に植栽されている主な樹木を対象に引張力および変位量の現地計測を行った。計測本数は、アラカシ21本、クスノキ24本、クスギ28本、ケヤキ22本、コナラ27本、ヤマザクラ34本、ソメイヨシノ33本、マテバシイ39本、ヤマモモ33本、合計261本であった。

本手法の現場計測状況を図5に示す。通常2名で樹木点検を行うことから、少人数でも大きな張力が得られるロープホイストを採用した。樹木の幹径に応じて地面から約2.0mの位置を約20~300kgで(0.5mm以上の変位量が発生するまで)引っ張り、最大引張力を計測した。またスマートフォンで所定の高さに取り付けたマーカーを録画し、画像上のマーカー座標変化から樹木の最大変位量を取得した。これにより、図5のように最大荷重時のしなり挙動が得られる。なお、機材は可搬性向上のため軽量化し、総重量約6kgとした(写真2)。



●図5——現場計測手順と変位量の説明

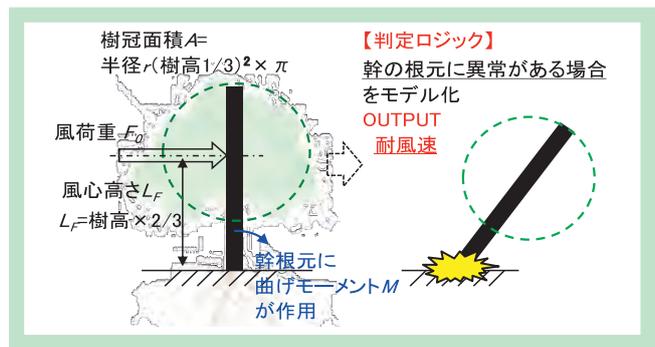


●写真2——計測用機材

3.2 耐風速の推定方法

図6のように、風力が樹冠に作用することで、幹根元に曲げ応力が生じる。

本報文では、片持ち梁の構造計算モデルで樹木の根の健全度を耐風速で評価する手法により、樹木の耐風速を推定した。耐風速の推定手順は、幹が円柱



●図6——耐風速評価の概念図

と仮定した片持ち梁モデルにより、計測で得た引張荷重と変位量から根系を含む見かけのヤング率を求める。次に同樹種の構造計算に用いる乾燥材のヤング率と見かけのヤング率の比率を求め、同樹種の構造材の許容強度にこの比率を乗じて、見かけの修正許容強度を算出する。樹冠に作用する風荷重を式(1)により算出し、式(2)の地際に作用する曲げモーメントと、式(3)の見かけの修正許容強度がつり合う風速を耐風速として推定した。なお、風荷重算出時の抗力係数は、既往研究⁴⁾から0.35を採用した。

$$\text{風荷重 } F(\text{N}) = 1/2 \times \rho \times V^2 \times A \times C_d \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

ρ : 大気密度 (kg/m^3), V : 風速 (m/s),
 A : 樹冠鉛直投影面積 (m^2), C_d : 抗力係数 (0.35)

$$\text{曲げモーメント } M(\text{Nm}) = F \times L_f \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

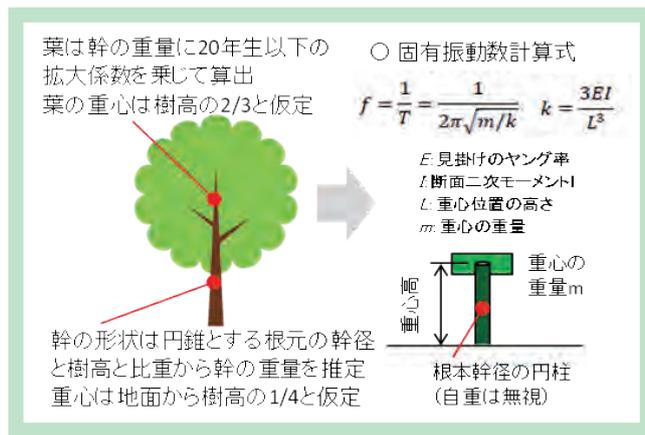
F : 風荷重による力 (N), L_f : 風心と根元の距離 (m)

$$\text{見かけの修正許容強度 } F_b (\text{最大 MPa}) = M/Z_0 \quad \text{式(3)}$$

Z_0 : 根元の断面係数 (cm^3)

3.3 固有振動数の算出

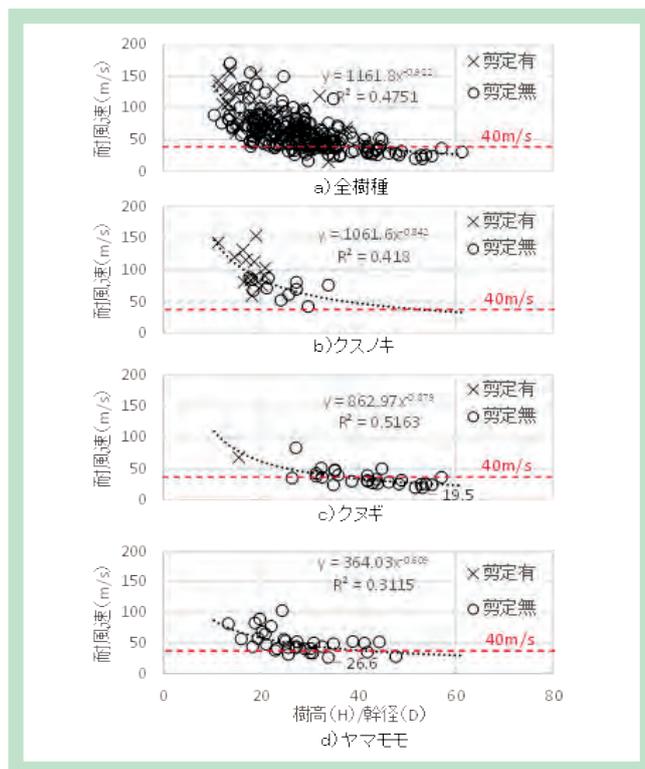
前述の耐風力の計算では、構造材としての樹木のヤング率が必要となるが、例えば、ヤマモモは通常は構造材として使用されないため、耐風速の推定に必要な構造材としてのヤング率が不明となっている。高速道路沿線の樹木には、このような樹種も多く、耐風力の推定が困難となるケースが想定される。そこで、同じ重さ、同じ寸法の場合、ヤング率が大きくなると固有振動数が大きくなることに着目し、樹木の比重と寸法と試験で得られた見かけのヤング率を用いて、単純化モデルにて固有振動数を算出し、推定耐風速との関係を整理した。なお、ここで算出した固有振動数は、形状を単純化して重量と重心を求め、片持ち梁として固有振動数を算出しているため(図7)、実際の樹木の固有振動数とは異なる。計算に用いた幹に対する葉の重量比率(拡大係数)は、森林総合研究所の資料⁵⁾から引用した。



●図7——固有振動数モデルの概念図

4——樹種毎の倒木特性と推定耐風速の関係

推定した耐風速の妥当性を検証するため、既往研究⁶⁾を参考に、幹の太さに対する樹高の比率と耐風速の関係を樹種ごとに整理した(図8)。全樹種では、樹高(H)に対して幹径(D)が細くなるほど、耐風速が低下する傾向となった。クスノキ(図8b)は、樹高に対して幹が太く倒木の恐れが無いが、クヌギ(図8c)は樹高に対して幹が細く、耐風速が低くなり注意を要する傾向となった。また、固有振動数から耐風速を推定したヤマモモ(図8d)の耐風速も低い傾向となったが、これは見かけのヤング率が低い傾向を示したことから、樹木自体が柔らかいため耐風速が低くなっていると考えられる。この

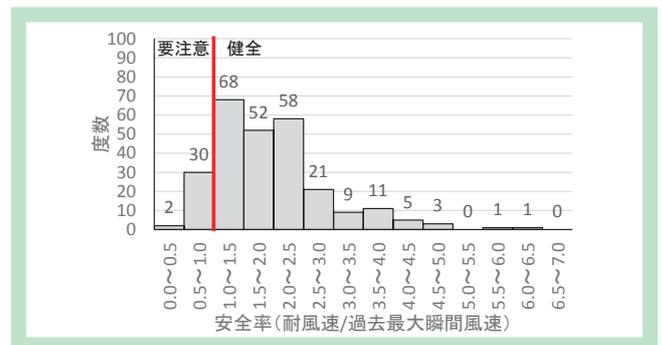


●図8——推定耐風速とH/D

ように、推定耐風速は、樹種ごとに違いはあるが一般的な傾向と同様の傾向を示すことから、妥当な推定結果であると考察した。

5——倒木リスク定量評価の活用方法

3章で算出した樹木の推定耐風速を、植生位置の過去の推定最大瞬間風速(図3)で除して求めた安全率の分布を図9に示す。おおむね、1.0~2.5の範囲にあるが、安全率1.0を下回るものが32本あり、点検では特に注意が必要、かつ早期の剪定実施が望ましいと考える。この内2本は、安全率0.5を下回っており、その1本を現地で確認した結果、地際の幹に腐朽の進行が確認された(写真3)。このように、引張試験を行えば耐風速を定量的に確認でき、過去の最大瞬間風速と比較することで倒木リスクを判断する目安となる安全率を得ることができる。



●図9——樹木の安全率



●写真3——安全率0.5を下回った樹木の状況(引き倒し後)

6——倒木リスク判別アプリケーションの開発

3章で行った検討(以下、「基礎検討」という)では、樹木の変位量については、取得用に撮影した動画から赤色のマーカーの色彩情報を手動抽出し、別途記録した引張応力や、乾燥材のヤング率をエクセルで計算するなど、全て手作業で耐風速の推定を演算していた。そこで、引張試験により取得したデータから倒木リスクの定量評価値を自動算出する専用アプリケーション(以下、「専用アプリ」という)を制作した。

6.1 マーカーの検討

樹木の変位量を画像から正確かつ自動で取得するため、マーカーについて検討した。基礎検討時は、図10aに示すように赤色に着色した球体を使用していた。しかし、動画でこのマーカーを確認すると日射による陰影の影響を受け、画像から円中心を自動で抽出できないことが判明した。そこで、図10bに示すように平面タイプのマーカーに変更したところ、背景画像との溶け込みによる誤検出が生じないことを確認した。



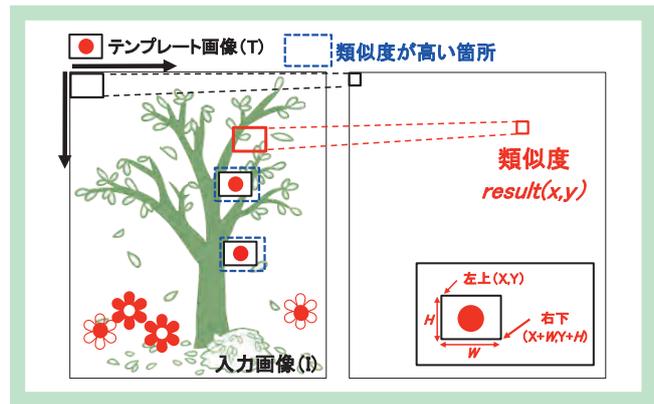
●図10——使用マーカー

6.2 画像処理方法の検討

樹木によって変位量は0.5～1 mm程度と小さい。そのため、画像からマーカーを正確に検出する画像処理方法が最も重要となる。マーカーを特定する方法としては様々あるが、画像処理でよく用いられている色抽出による重心計算（以下、「色抽出法」という）と、テンプレートマッチング法について検討した。色抽出法の利点は処理速度が速いことである。基礎検討ではこの方法により、対象動画からマーカーの色を特定し、その重心位置から変位量を求めていた。しかし、この手法では、画角内の赤色が抽出対象となるため、赤い花などを誤検出するケースがあった。また、外乱光によってマーカーの色が変化した場合は、うまく検出できないといったデメリットがあった。一方、テンプレートマッチング法は、あらかじめ準備または撮影動画から切り抜いたテンプレート画像と相関の高い箇所を特定する方法である。具体的には、図11に示すように、テンプレート画像を入力画像内でスライドさせ、式(4)の正規化相関関数で類似度（*result*）が最大になる位置を求める手法である。

$$result(x,y) = \frac{\sum_{i,j} (T'(i,j) \cdot I(x+i,y+j))}{\sqrt{\sum_{i,j} T'(i,j)^2 \cdot \sum_{i,j} I(x+i,y+j)^2}} \quad \dots\dots \text{式(4)}$$

I: 入力画像 *T*: テンプレート画像 *result*: 出力結果



●図11——テンプレートマッチング概説図

類似度は0から1で表され、値が1に近いほどテンプレートと対象領域が高い類似性を有することを意味している。画像左上から類似度を求めるため、偶然テンプレートと似た部分が存在した場合、ミスマッチが発生する。このミスマッチを排除するためには、適切な閾値を設定することが不可欠となる⁷⁾⁸⁾。本法は色抽出法に比べて処理速度は遅くなるが、色の濃度が違っていても、赤い丸と周囲の白色領域とで認識でき、外乱光の影響下であってもマーカーを認識可能であった（図12）。

以上の理由から専用アプリではテンプレートマッチング法を採用した。次に準備するテンプレート画像の注意点について言及する。図13に示すように、テンプレートの赤丸と白領域の比率の違いにより、誤検出する可能性があるため、テンプレート画像の白色領域も考慮する必要がある。また、撮影距離によりテンプレートの画素数が異なるため、図14に示すように撮影距離に応じたテンプレート画像を選択できるようにした。

6.3 専用アプリの開発

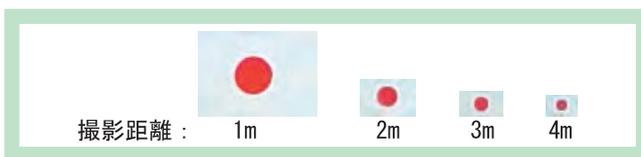
専用アプリはプログラミング言語pythonで開発した。pythonには非常に多くのライブラリが用意されており、このライブラリを利用することで一からコードを構築する必要がなく効率的に開発を行うことができる。メインとなる画像処理は画像処理ライブラリ「OpenCV」を用いた。このアプリは動画を1フレームずつ読み込み、テンプレート画像とのテンプレートマッチング処理により3つのマーカー位置の座標値を取得する。録画中は、この3つのマーカー位置の座標データを蓄積しておき、録画終了後に蓄積した座標データからX軸の最大変位量を算出して本報文中で確立した算出ロジックに当てはめて耐風速を算出し結果を表示する（図15）。



●図12 — 外光の違いによる抽出例



●図13 — 誤検出の事例



●図14 — 撮影距離に応じたテンプレート画像



●図15 — 専用アプリの画面遷移

6.4 専用アプリ計測結果の検証

専用アプリによる計測結果と基礎検討で行った引張試験データ値との比較検証を行った。過去録画したデータを専用アプリに読み込んで、色抽出法で画像処理を行った基礎検討の値と専用アプリでの結果を比較した(表1)。若干の差異が発生しているものの、概ね同等の耐風速を算出しており、テンプレートマッチング処理による変位量算出精度は問題ないと評価できる。今後、専用アプリ計測値と実計測(距離計を設置して実際の変位量を計測する)による検証を実施する予定である。

●表1 — 専用アプリによる自動算出の検証

No	樹種	耐風速(m/s)		
		①基礎検討 (手動計算)	②アプリによる 自動演算	差分 ②-①
1	ソメイヨシノ	38.9	37.7	1.15
2	ヤマサクラ	30.6	30.1	0.45
3	ヤマサクラ	27.6	27.1	0.51
4	ヤマサクラ	39.1	38.4	0.73
5	ヤマサクラ	155.9	157.2	1.34
6	ヤマサクラ	35.5	34.2	1.30
7	ヤマサクラ	45.8	45.0	0.77
8	ヤマサクラ	25.6	25.0	0.60
9	ソメイヨシノ	76.0	73.5	2.45
10	ソメイヨシノ	137.2	133.4	3.77
11	マテバシイ	50.5	48.0	2.48

7 — おわりに

本報文では、簡易な作業で耐風速を定量化する手法と、過去の最大瞬間風速を用いて、倒木リスク判断に資する安全率を得ることを可能とした。今後は、完成した専用アプリを用いて、現場検証を進め、樹木点検の合理化に繋がる提案を行う予定である。最後に本検討の活用イメージを図16に示す。GISを活用し蓄積した耐風速計測結果の見える化である。実現すれば、例えば、台風来襲後の通行止め解除前点検時などにMAP上で要注意樹木の位置を確認す



●図16 — 活用イメージ

ることが可能となる。また、緑地管理支援アプリと連携することで緑地管理業務の更なる効率化が期待できる。今後も引き続き、業務の高度化・効率化を目指して取り組んでいきたい。

なお、本技術は、2024年12月2日放送されたNHKニュース「おはよう日本」の中で紹介されている。

参 照 文 献

- 1) earth : <https://earth.nullschool.net>, (閲覧日 : 2022.3.30)
- 2) 気象庁サイト : https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kaze.html, (閲覧日 : 2024.8.7)
- 3) 飯塚康雄, 舟久保敏 : 街路樹の倒伏対策の手引き 第2版, 国土技術政策総合研究所資料 1059号, 1-2, 2019.
- 4) 飯塚康雄, 舟久保敏 : 街路樹の倒伏対策の手引き 第2版, 国土技術政策総合研究所資料 1059号, 1-16, 2019.
- 5) (独) 森林総合研究所 : 木1本に固定されている炭素の量, (更新日 : 2010.10.2) <http://www.ffpri.affrc.go.jp/research/dept/22climate/kyuushuuryou/>, (閲覧日 : 2024.8.9)
- 6) C・マテック : 最新 樹木の危険度診断入門, 街路樹診断協会, 2008.
- 7) 高木幹雄・下田陽久 : 新編画像解析ハンドブック 東京大学出版会 P.1669.
- 8) OpenCV cv2.matchTemplateテンプレートマッチングを行う方法 : <https://pystyle.info/opencv-template-matching/>, (閲覧日 : 2023.4.26)



山下 民岐子
西日本高速道路エンジニアリング四国(株)
技術本部 技術部
統計分析課
課長代理



橋爪 謙治
西日本高速道路エンジニアリング四国(株)
技術本部 技術部
技術統括課
課長