

研究資料 (Research record)

シカ防護柵に使われる各部材の強度試験 —支柱の折り曲げ・アンカー杭の引き抜き・裾ロープの引き上げ—

大谷 達也^{1)*}、米田 令仁¹⁾

要旨

シカ除け防護柵の部材である支柱・アンカー杭・裾ロープについて、それぞれ折り曲げ・引き抜き・引き上げの強度試験を実施した。動物除け防護柵の支柱として市販されているものの、支柱折り曲げ強度には製品ごとに平均 66 N から 396 N と幅があった。全長の長いアンカー杭が垂直・斜め・水平のいずれの方向でも引き抜き強度が大きく、粘土質造成土では礫混じり砂質土よりも大きな値を示した。アンカー杭を斜めに引き抜く場合のほうが垂直の場合よりも大きな引き抜き強度を示したため、裾ロープおさえのアンカー杭に斜め方向の力がかかるように裾ロープとアンカー杭頂部を連結することを防護柵の改善案として挙げた。

キーワード：ロードセル、ニホンジカ、土壌貫入計、土質、イノシシ

1. はじめに

現在、ニホンジカ (*Cervus nippon*、以下シカ) は農業・林業ともにもっとも深刻な加害獣となっており (農林水産省 2021, 林野庁 2021)、農山村の振興にとって大きな障壁となっている。国内の林業においてはスギ・ヒノキ人工林の成熟にともない木材生産が盛んになっているものの、伐採後の再造林にあたって苗木のシカによる被害が甚大となる場合がある。再造林地におけるシカによる苗木被害を防ぐために、忌避剤、単木保護資材、および防護柵といったさまざまな対策がとられ、なかでも防護柵は国有林・民有林ともに一般的にひろく適用されている。

数メートル間隔で立てた支柱に樹脂・金属製ネットを取り付けて再造林地の外周を囲む防護柵は、設計通りの機能を発揮すれば再造林地からシカを排除し続けることができ苗木防護の性能は高いと期待される。しかし実際には、設置後の破損によってシカ・カモシカが侵入し苗木に深刻な被害を受けた林分が多数あることが報告されている (高柳・吉村 1988, 酒井 2018)。防護柵が破損する原因として倒木や落石といった動物以外の要因による場合もあれば、動物が防護柵に干渉してネットを破る、防護柵下端がこじ開けられてアンカー杭が抜けるといった場合もある。これまでに動物の侵入過程を報告した例では、防護柵下端が浮き上がってシカの侵入を許すことが多く (尾崎 2001)、イノシシが防護柵を破壊したあとにシカが侵入するといったことがいわれている (日下・法眼 2018)。防護柵は地表面の不安定な山地に設置され動物の干渉を受けながら長期に使用されるので費用が許す限り

頑丈にしたいところであるが、設置の際には最終的に各部材を人力で運ぶため重量の制限があり際限なく強度を上げることはできないのが現状である。

そのような状況においても、より丈夫で防御力の高い防護柵を目指して、入手可能な資材を使った工夫や新たな仕様が検討・提案されている (三重県林業研究所 2016, 佐渡・田戸 2017, 四国森林管理局 2019, 森林整備センター 2020, 小長井・宮田 2021)。現状では農林業用の防護柵としてさまざまな業者から製品が市販されており、それぞれに仕様や強度が異なると予想される。また地面に打ち込まれるアンカー杭では、土質のちがいによって引き抜ける荷重が異なることも想定される。現状で使用されている防護柵がどのような原因で機能を失うにせよ、その性能を改善していくためには、外力に対して防護柵の各部材が十分な強度をもっているのか、なんらかの改善によって破損頻度を低減できる余地があるのかを確かめておく必要がある。複数の製品の強度や土質によるちがいを整理しておくことは、林業事業者が現場の状況に合わせた細かな工夫をするためにも参考になるだろう。

そこで本稿では、防護柵の支柱やアンカー杭といった各部材について力学的な特徴を整理した。すなわち、1. 異なる仕様の支柱の折り曲げ強度、2. 異なる仕様のアンカー杭・土質・引っ張り角度のアンカー杭引き抜き強度、および 3. 防護柵下端を模した、複数のアンカー杭でロープをおさえた場合のロープ引き上げ荷重について複数の場所で試験をおこなったので報告する。

原稿受付：令和 4 年 4 月 8 日 原稿受理：令和 4 年 5 月 17 日

1) 森林総合研究所 四国支所

* 森林総合研究所 四国支所 〒780-8077 高知県高知市朝倉西町 2-915

2. 材料と方法

2.1 支柱の折り曲げ試験

支柱の折り曲げ試験にあたっては7種類の製品を用意した (Table 1)。これらの製品は製造メーカーが想定した使用法や農地・林地向けにかかわらず、ウェブサイトなどで「防獣柵支柱」、「防護柵支柱」として販売されているものを使用した。森林総合研究所四国支所構内において (高知県高知市、砂利混じり粘土質造成土)、各製品 10 本ずつを垂直に突き立て頂部にかけたワイヤーをウインチ

(Warn Industries Inc., Drill Winch 340kg) で引きながらロードセル (イマダ、ZTA-SW1-5000N) で引っ張り荷重を測定した (Fig. 1a)。各製品は全長が異なるものの、地上の高さが 1.8 m になるように地面に打ち込んだ。各支柱の頂部にワイヤーをかけた後下方へ 20 度前後の角度で引けるように、支点となる立木までの距離が 5 から 6 m となる位置に支柱を設置した。支点の立木根元とウインチの間にロードセルを挟み、引っ張り荷重を連続的に 1/100 秒ごとに測定した。ウインチをゆっくり作動させていくと支

Table 1. 折り曲げ試験に供した支柱の特徴

タイプ	材質および構造	直径 (mm) ^a	全長 (mm) ^a	肉厚 (mm) ^b	重量 (g) ^c
A	FRP 管、黒色樹脂被覆、先端加工 ^d	35	2,700	2.6 (FRP 管のみ) 3.5 (被覆含む)	1,237
B	鋼管、黒色樹脂被覆、先端加工 (果樹などの枝つり支柱) ^e	25	2,100	0.4 (鋼管のみ) 0.9 (被覆含む)	575
C	鋼管、茶色樹脂被覆、先端加工	31.8	2,100	0.5 (鋼管のみ) 0.9 (被覆含む)	899
D	鋼管、黒色樹脂被覆、先端加工	33	2,100	0.7 (鋼管のみ) 1.4 (被覆含む)	1,136
E	鋼管、被覆なし、両端開放、杭分離式、断面正方形鋼管 (杭)	38 (支柱) 25 角 (杭)	1,800 (支柱) 990 (杭)	0.5 (支柱) 1.6 (杭)	1,107 (支柱) 838 (杭)
F	鋼管、茶色樹脂被覆、先端加工なし、杭分離式、樹脂被覆鋼管 (杭) (ニホンザル向けの電気柵用支柱) ^e	34 (支柱) 26 (杭)	2,200 (支柱) 900 (杭)	0.6 (鋼管のみ) 2.0 (被覆含む)	1,441 (支柱) 542 (杭)
G	片側長辺が解放された長方形断面の鋼材、被覆なし、先端加工なし	40 × 25 (長辺 × 短辺)	2,500	1.45	3,358

a) 製造メーカーのカatalog公表値、b) マイクロメータによる実測値、c) 実測値の平均 (n = 4)、d) 地面に打ち込みやすいように先端が尖った部品が付いている、e) 製造メーカーでの製品仕様が防護柵支柱ではない場合に本来の用途を記した。

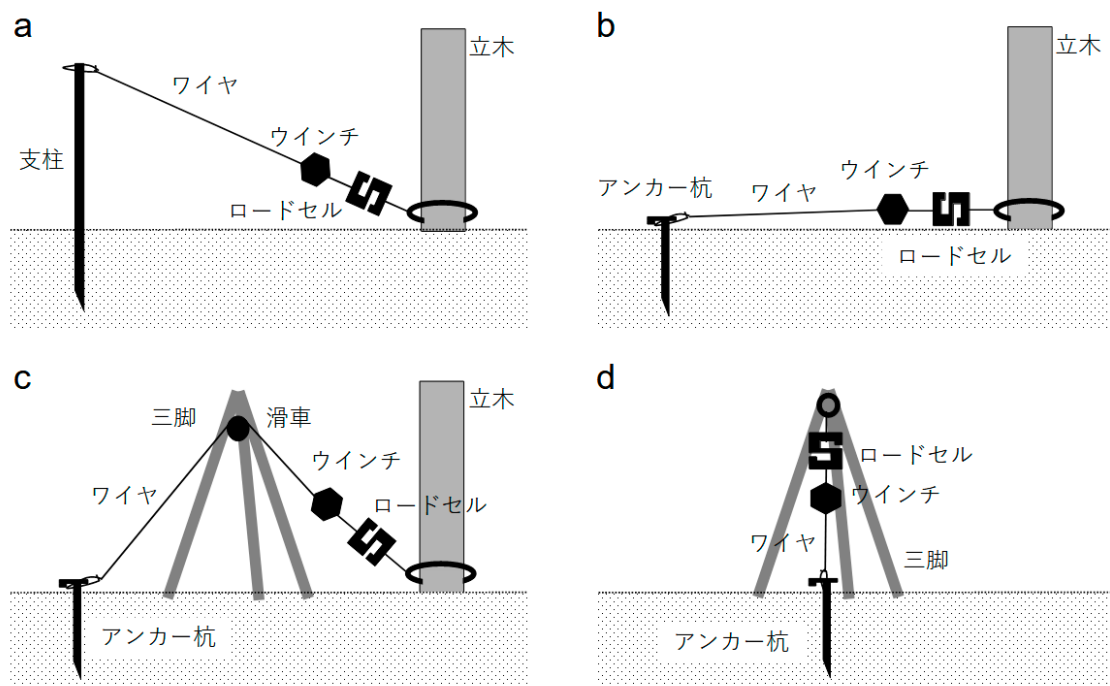


Fig. 1. 支柱折り曲げ試験およびアンカー杭引き抜き試験の実施状況

a) 支柱の頂部 (高さ 1.8 m) にワイヤーをかけて折り曲げる、b) アンカー杭を水平方向に引き抜く、c) 斜め 45 度に引き抜く、および d) 垂直に引き抜く場合の荷重を測定した。

柱がしなり最終的に支柱が折れ曲がり破損あるいは不可逆的に変形するため、破損または不可逆的な変形までの最大荷重を折り曲げ強度とした。また初期位置から破損時までのワイヤーが引かれた長さをメジャーで測定した。杭と支柱が分離式の E と F タイプについては、まず杭だけを地中に打ち込み、次に地中から突き出た杭に支柱を被せる構造になっている。これらについては、それぞれ専用品として販売されている杭を地上に 50 cm が突き出るように打ち込んだ。杭と支柱が分離式となっており支柱の全長が 2.2 m あるタイプ F では、支柱頂部ではなく地面から 1.8 m となる位置にワイヤーをかけた。さらに F タイプでは支柱ではなく杭が先に変形したため、最初の 5 本は杭の変形までの荷重を測定し、残りの 5 本は支柱のみをコンクリート側溝に固定して 1.8 m の長さで荷重をかけて破損までの最大荷重を記録した (F' タイプ)。G タイプの断面形状は片方の長辺が解放された長方形であるため、引っ張り方向に短辺を向けたものと長辺を向けたものを半数ずつ設置した。2021 年 6、7 月および 10 月に上記の試験をおこなった。

2.2 アンカー杭の引き抜き試験

アンカー杭の引き抜き試験にあたっては 4 種類の製品を用意した (Table 2)。いずれも農林業での使用を想定して販売されているもので、再造林地向けの防護柵に付属して販売されているものを含んでいる。地質や土質の異なる 3 か所において (Table 3)、各アンカー杭を水平、斜め 45 度、および垂直に引き抜く際の引っ張り荷重を前述と同様にロードセルで測定した (Fig. 1b, c & d)。アンカー杭の頂部が地面と同じ高さになるまで垂直に打ち込み、頂部にワイヤーをかけてウインチで引き、支点との間に設置したロードセルで引っ張り荷重を経時的に測定した。アンカー杭が地面から引き抜ける、または折れるまでの

最大荷重を引き抜き強度とした。水平および斜め 45 度に引き抜く場合は立木根元を支点とし、斜め 45 度の場合にはアンカー杭と立木の間に設置した三脚の滑車を介した (Fig. 1b & c)。垂直に引き抜く場合はアンカー杭の真上に三脚を設置して、ロードセルとウインチを吊して支点とした (Fig. 1d)。それぞれの場所ごとにアンカー杭の種類・引き抜き方向の組み合わせのそれぞれについて 5 回ずつ繰り返した。土壌の堅さを評価するため、それぞれの場所ごとに土壌貫入計による測定をおこなった。各場所 3 回ずつ長谷川式土壌貫入計 (ダイトテクノグリーン、H-60N、落錘 2 kg、ロッド長 60 cm) の貫入棒が 40 cm 刺さるまで試行し、ウエイト落下数の合計とともに落下ごとの貫入量 (cm drop⁻¹, S 値) の平均値を算出した。2021 年 11 月および 2022 年 1 月にいずれの場所でも数日間の晴天が続いたのち、上記の試験をおこなった。

データ解析には R 4.0.5 を使用した (R Core Team 2021)。アンカー杭の引き抜き強度に及ぼす影響を検討するため、引き抜き強度を応答変数、引き抜き方向、アンカー杭の種類、および場所を説明変数とした一般線形モデルを構築した (lm 関数)。その際、引き抜き強度の分布がわずかに偏っていると認められたため、Box-Cox 変換によって正規性を確保した (car 3.0-13、powerTransform 関数、 $\lambda = 0.3324$)。各説明変数の効果を分散分析によって評価し (anova 関数)、アンカー杭の種類については多重比較をおこなった (multcomp 1.4-19、glht 関数、Tukey 法、 $\alpha = 0.05$ レベル)。

2.3 複数アンカー杭でおさえたロープの引き上げ試験

再造林地に防護柵が設置される場合、3 から 4 m 間隔の支柱間に張った防護柵ネット下端 (裾) のロープを複数のアンカー杭でおさえることが一般的であるが、補助金対象となる防護柵の仕様として支柱間の距離やアンカー

Table 2. 引き抜き試験に供したアンカー杭の特徴

タイプ	材質および構造	断面形状	直径・幅 (mm) ^a	全長 (mm) ^c	重量 (g) ^d
I	プラスチック製、黒色、テーパー形状、高さ 10 mm の突起 4 か所	H 型	22 × 21 ^b	400	114
II	鉄芯プラスチック被覆、黒色、高さ 3 mm の段 2 か所	丸型	φ 12	300	90
III	プラスチック製、灰色、高さ 5 mm の突起 4 か所	H 型	16 × 15	430	68
IV	プラスチック製、黒色、高さ 5 mm の突起 4 か所	H 型	16 × 14	360	51

a) 突起部などを含まない軸の部分で計測、b) 最も太い杭上部の値、c) メーカー公表のカタログ値、d) 実測値の平均 (n = 4)。

Table 3. アンカー杭の引き抜き試験を実施した場所の特徴

場所	地質	土質	土壌貫入計 ^a
四国支所構内 (高知市)	非海成層	砂利混じり粘性土 (造成土)	52 回, 0.74 ± 0.43 cm
高知県香美市の皆伐地	海成層泥岩	礫混じり砂質土	63 回, 0.63 ± 0.62 cm
愛媛県今治市の皆伐地	花崗閃緑岩	礫混じり砂質土 (まさ土)	57 回, 0.68 ± 0.72 cm

a) 長谷川式土壌貫入計の先端が深さ 40 cm に到達するまでの打撃数の平均値、および 1 打撃あたり貫入量 (S 値) の平均値と標準偏差を示す (各場所 3 回計測)。

杭の本数が定められている場合がある。そのため、裾おさえのアンカー杭本数を増やした場合に、裾おさえの効果がどれほど変化するかを評価した (Fig. 2)。前述のアンカー杭引き抜き試験をおこなった場所のうち、森林総合研究所四国支所構内および愛媛県今治市郊外皆伐地の2か所において、3 m 間隔でアンカー杭を設置して径 6 mm のポリエチレン三つ撚りロープを結びつけた。そのロープをおさえるために、2 本、あるいは 4 本のアンカー杭を等間隔に打設し (1 m 間隔および 60 cm 間隔)、両端アンカー杭の中央位置でロープを垂直に引き上げて地面とロープの隙間および引き上げ荷重を測定した。飼育下の実験によれば、ホンシュウジカがぐり抜けられる地際隙間は 20 から 30 cm の範囲であるとされている (堂山ら 2016)。そのため、ロープが地面にぴったりついた状態から徐々に引き上げて、地面との隙間が 10 cm、20 cm、30 cm、および 35 から 40 cm となる時点までの最大荷重を記録した。また、各時点においてロープ引き上げ作用点の両隣に打ち込んだ杭が、1. まったく動かない、2. 垂直方向に浮き上がり始めた、および 3. 完全に引き抜けた、のいずれの挙動を示したかを記録した。すべての試行において、最終的に 35 cm ほどロープを引き上げると作用点の両隣のうち少なくとも片側の杭が完全に引き抜けたので、試験の終了はロープを 35 から 40 cm 引き上げていずれかの杭が完全に抜けたときとした。前述と同様、三脚からつり下げたウインチおよびロードセルを用いた (Fig. 2)。1 m 間隔および 60 cm 間隔のアンカー杭打設のそれぞれについて、各場所で 5 回ずつ試行した。この試験にあたっては、前述のアンカー杭引き抜き試験で

もっとも折れにくく、林業現場で使用されていることの多いタイプ I のアンカー杭を使用した。いずれの場所でも 2021 年 12 月に数日間の晴天が続いたのち、上記の試験をおこなった。

3. 結果と考察

3.1 支柱の折り曲げ試験

7 種類の支柱を使って破損までの引っ張り荷重の最大値、すなわち折り曲げ強度を比較したところ、FRP 管製の A タイプがもっとも大きな値 (396 ± 45 N、平均値 $\pm$ SD) を、D、E、および G タイプがそれに次ぐ 250 から 300 N 程度の値を (順に 257 ± 58 N、 272 ± 10 N、 293 ± 30 N)、B および F タイプが 80 N 以下のもっとも小さな値を示した (66 ± 15 N および 71 ± 10 N、Fig. 3a)。全長や直径がほぼ同等の C および D タイプでは、鋼管がより肉厚な D タイプのほうが大きな折り曲げ強度を示した (順に 138 ± 39 N、 257 ± 58 N、Table 1、Fig. 3a)。F タイプでは杭とともに支柱を折り曲げた場合よりも、支柱だけを側溝に固定した場合 (F') のほうが大きな値を示した (順に 71 ± 12 N、 114 ± 12 N)。不可逆的な変形、すなわち破損までに支柱頂部 (荷重の作用点) がどれほど移動したかの変位量をみると、A タイプが最大の 1.5 ± 0.2 m となった (Fig. 3b)。つまり A タイプは破損するまでに支柱頂部が 1.5 m 移動するほどしなむことができるということである。対照的に E、F、および G タイプでは 0.6 m 未満の変位量で破損がおこった。感覚的な記載をすると、A タイプでは成人男性が両手で頂部をもって体重をかけると折れる程度、B や F タイプでは片手で頂部を引くと折れる程度で

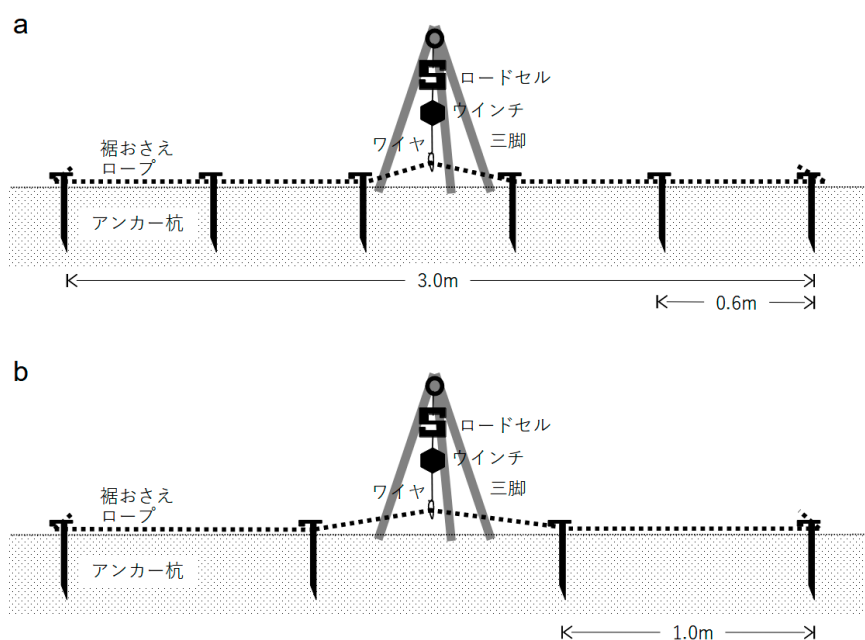


Fig. 2. 複数アンカー杭でおさえたロープの引き上げ試験の実施状況

3 m の間隔をあけて両端を固定したロープを、a) 4 本のアンカー杭でおさえた場合 (60 cm 間隔)、および b) 2 本でおさえた場合 (1 m 間隔) について、ロープ中央部を垂直に持ち上げる荷重を測定した。

ある。A から D、および F タイプ (F' も含む) については、地際を支点として支柱および専用杭が折れ曲がったが、E タイプでは支柱内部の杭の上端、すなわち支柱頂端から 130 cm の位置で折れ曲がった。ほとんどの製品では破損がおこった後には極端に小さな荷重で変形させることができるものの、G タイプでは不可逆的に変形した後もさらに曲げ続けるには最大荷重の 8 から 9 割程度の荷重をかける必要があった (Fig. 4)。G タイプでは短辺方向に引いた場合は地際で折れ曲がったが、長辺方向に引いた場合は地際から 50 cm から 1 m ほどの部分が 90 度捻れながら曲がった。

B および F タイプを動物用の防護柵支柱として販売するウェブサイトがあるものの、製造メーカーでは別の目的で作られているため (Table 1)、ほかの製品に比べて折り曲げ強度が弱いようだ。G タイプは農地用の金属メッシュ柵支柱として販売されており再造林地で使うにはかなりの重量があるが、他の製品とは異なり無理な荷重によって不可逆的に変形したとしてもその後にも機能し、ある程度はもとの形状に戻すことも可能と考えられる。E タイプでは折り曲げ強度のばらつきが非常に小さく、10 本すべてが支柱内部の杭頂部の位置で折れ曲がった。専用

品として販売されている杭の端 (両端が同じ形状) は鋭利な角になっており、ここに応力が集中して破損するために折り曲げ強度のばらつきがほかの製品よりも小さいものと考えられる。杭分離式の E タイプは急傾斜など足場の悪いところでは設置作業がしやすいと考えられるものの、A タイプに比べると折り曲げ強度や破損までの変位量が小さいため、控え索を多めに設置するなど工夫が必要であろう。それぞれの製品特性を生かして適切に防護柵を設置するとともに、長期にわたり設計通りの性能を発揮させることが求められる。

3.2 アンカー杭の引き抜き試験

アンカー杭の引き抜き試験を実施した 3 か所について、土壌貫入計による測定結果を Fig. 5 に示した。貫入棒が深さ 40 cm に達するまでの重り落下数、および S 値の平均値では 3 か所に大きな違いはないものの (Table 3)、森林総合研究所四国支所構内の粘土質造成土では深さ 10 から 40 cm まで比較的一定して S 値 1 cm 前後の値を示すのに対して (Fig. 5a)、今治市郊外の花崗岩地帯、および香美市郊外の泥岩地帯の尾根筋では深さ 15 cm まで柔らかい土壌であるものの 15 から 20 cm よりも深い部分では S 値 0.5 cm ほどの固い土壌となった (Fig. 5b & c)。ただし高知県香美市郊外の皆伐地では 30 cm の深さになっても S 値 2 cm ほどの柔らかい土壌がみられる箇所もあった。四国支所構内の造成土では浅い部分から土壌が締まっているのに対し、二つの皆伐地の尾根筋では 15 cm 程度の浅い土層の下に固く締まった土層や風化の進んだ母岩

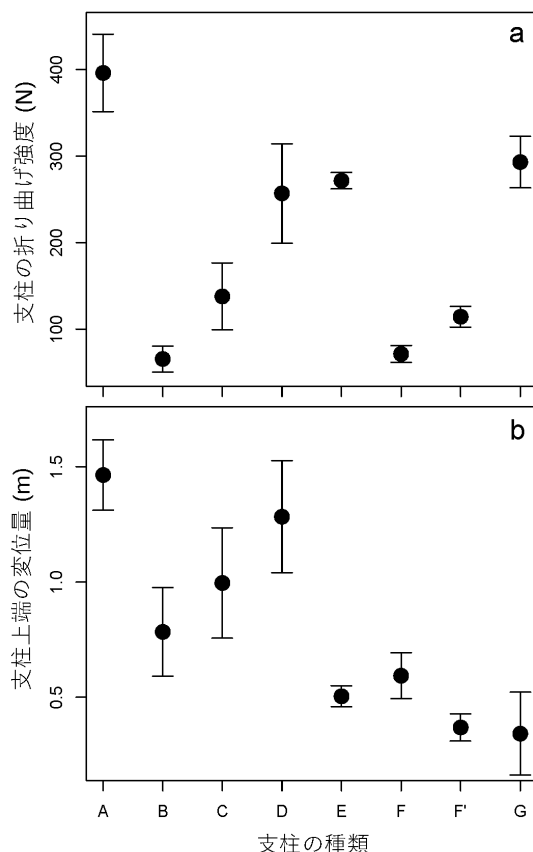


Fig. 3. 支柱折り曲げ試験の結果

a) 支柱の折り曲げ強度 (破損までの最大引っ張り荷重)、b) 破損時までの引っ張り変位量。支柱のタイプごとに 10 本ずつ、ただし F および F' については 5 本ずつを供試した (詳細は本文を参照のこと)。● は平均値、ヒゲは標準偏差を示す。

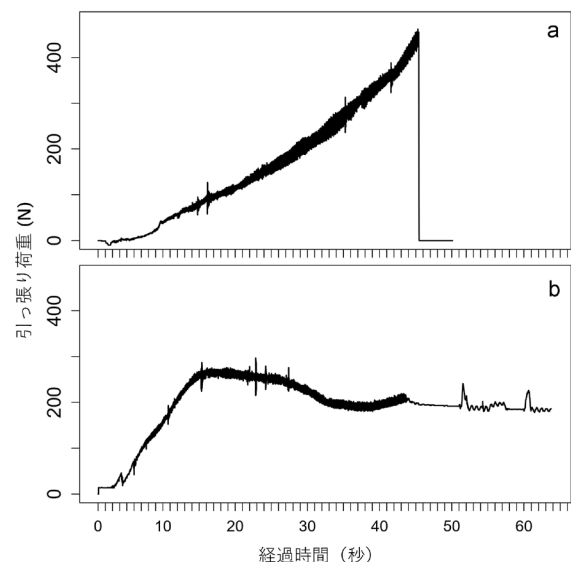


Fig. 4. 支柱折り曲げ試験での引っ張り荷重実測値の一例

a) 支柱 A タイプ、および b) G タイプについて、ロードセルで測定した 1/100 秒ごとの引っ張り荷重の経時変化の一例を示す。A タイプでは引っ張り荷重が最高値に達して支柱が破損したあとは引っ張り荷重はゼロになるが、G タイプでは最高値を示して支柱が不可逆的に変形しはじめたのちにも、さらに曲げ続けるには荷重をかける必要があった。

があると推察される。S 値 0.7 cm を下回ると樹木根系の伸長が困難なほど固く締まった土壌とされるので (日本造園学会 2000)、二つの皆伐地の地表下 20 cm より深い場所は造林木の成長に影響するほど固いといえる。

引き抜き方向、アンカー杭の種類、および場所ごとに引き抜き強度を Fig. 6 に示した。引き抜き強度を応答変数、アンカー杭の種類・引き抜き方向・場所を説明変数とした一般線形モデルによる解析では、いずれの説明変数も引き抜き強度に有意に影響し (杭の種類 $F = 17.8$ 、引き抜き方向 $F = 10.9$ 、場所 $F = 91.0$ 、いずれも $p < 0.001$)、Table 4 の係数推定値を得た。まず、直感的に予想される結果と一致するが、斜め 45 度に引き抜く場合に比べて (703 ± 301 N、平均値 $\pm$ sd)、垂直に引き抜く場合は引き抜き強度が有意に小さく (496 ± 235 N)、水平の場合には有意に大きかった ($1,127 \pm 387$ N)。アンカー杭を水平に引き抜いた場合には杭の湾曲が頻繁にみられ、合計 7 本で杭の破損が起こった。タイプ I および II ではそれぞれ 1 本の破損が四国支所構内であり、杭頂部の一部の欠損や先端部のみの破損であったのに対し、タイプ III あるいは IV では杭本体の中間部での折損がいずれの場所でもみられた (順に 2 および 3 本)。杭が破損した場合だけの引き抜き強度を平均すると $1,423 \pm 337$ N ($n = 7$) となり、この程度の荷重が杭の軸方向と直角にかかる杭が破損するといえる。次に、アンカー杭の種類別に引き抜き強度を多重比較した結果、平均値の大きなタイプ I (893 ± 412 N) とタイプ III (924 ± 445 N) に対して、平均値の小さなタイプ II (617 ± 352 N) とタイプ IV (649 ± 325 N) のよう

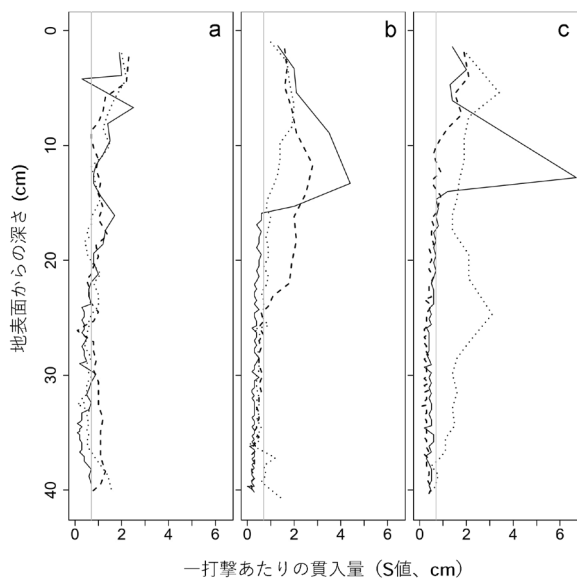


Fig. 5. アンカー杭引き抜き試験を実施した 3 か所における土壌貫入計による測定結果

a) 森林総合研究所四国支所構内 (高知市、砂利混じり粘土質造成土)、b) 愛媛県今治市郊外皆伐地 (花崗岩地帯)、および c) 高知県香美市郊外皆伐地 (海成層泥岩質)。それぞれの場所で 3 回の測定をおこない、異なる線種で表示した。灰色縦実線は S 値 0.7 cm を示す。

に二分された。最後に、場所による差については香美市郊外の皆伐地 (734 ± 361 N) に比べ、森林総合研究所四国支所構内 (889 ± 443 N) では引き抜き強度が有意に大きく、今治市郊外の皆伐地 (696 ± 397 N) では有意に異なるとは

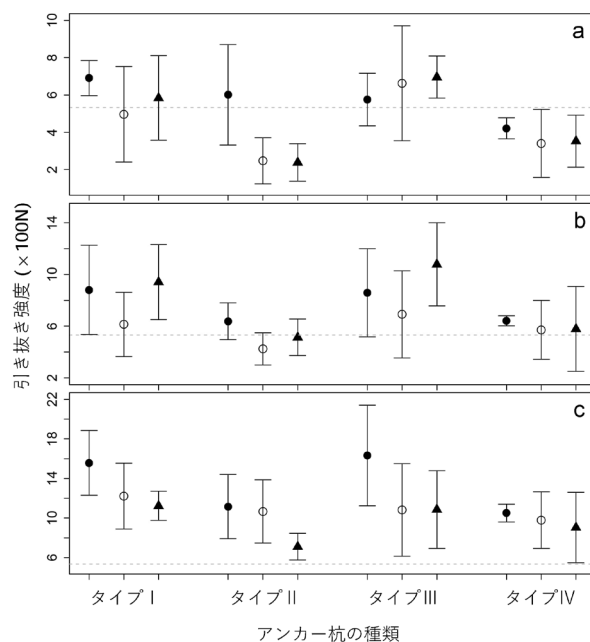


Fig. 6. アンカー杭引き抜き試験の結果

a) 垂直方向、b) 斜め 45 度、および c) 水平方向の引き抜き試験の結果を示す。●森林総合研究所四国支所構内 (砂利混じり粘土質造成土)、○今治市郊外皆伐地 (花崗岩地帯)、および▲香美市郊外皆伐地 (海成層泥岩質)。それぞれの場所・アンカー杭について引き抜き強度の平均値および標準偏差を示す。それぞれのグラフで縦軸のスケールが異なることに注意 (比較のしやすさのため灰色横破線は同じ値 533 N を示す。ここで 533 N とはイノシシが鼻先で持ち上げる力 (西日本農業研究センター 2016) に相当する)。

Table 4. アンカー杭引き抜き試験の一般線型モデルによる係数の推定結果

変数	推定値 $\pm$ 標準誤差	t 値	p 値
切片	24.2 ± 0.67	36.4	< 0.001
アンカー杭の種類			
タイプ II	-3.63 ± 0.66	-5.5	< 0.001
タイプ III	0.34 ± 0.66	0.5	0.6
タイプ IV	-3.02 ± 0.66	-4.5	< 0.001
場所			
四国支所構内	1.88 ± 0.58	3.3	< 0.01
今治市郊外	-0.59 ± 0.57	-1	0.3
引き抜き方向			
垂直	-3.05 ± 0.57	-5.3	< 0.001
水平	4.64 ± 0.58	8	< 0.001

調整済み $r^2 = 0.58$ 、 $F_{7,174} = 36.7$ 、 $p < 0.001$ 。アンカー杭の種類についてはタイプ I を、場所については香美市郊外を、引き抜き方向については斜め 45 度を基準とした結果を示す。

いえなかった。

引き抜き強度が大きいタイプⅠおよびⅢでは全長が400 mm以上あるのに対し、引き抜き強度が小さいタイプⅡおよびⅣでは全長が400 mm未満であった (Table 2)。ステンレスパイプを杭に見立てた模型実験では、垂直に引き抜く場合には引き抜き強度は杭長に比例し、斜めに引き抜く場合には杭長の二乗に比例することが示されている (木全ら 2006)。本試験ではタイプⅢとⅣでは断面形状がほぼ同じでタイプⅢの全長がⅣのほぼ1.2倍であり (Table 2)、垂直引き抜きの場合にはタイプⅢの引き抜き強度 (平均値 637 N) がタイプⅣ (372 N) のおよそ1.7倍、斜め引き抜きの場合にはタイプⅢ (877 N) がタイプⅣ (598 N) のおよそ1.5倍となった。この結果は前述の模型実験とは必ずしも一致しないものの、杭長を長くすることの意義は認められる。側面の突起の効果については定量的に評価することはできないが、高さ10 mmの突起がついたタイプⅠが5 mm突起付きのタイプⅢよりも大きな引き抜き強度を示すわけではなかった (Table 2 & 4)。

アンカー杭の引き抜き強度は、礫混じり砂質土である香美市皆伐地よりも砂利混じり粘性土である森林総合研究所四国支所構内で高かった (Table 3 & 4)。杭を垂直に引き抜く場合の強度を決める最大周面摩擦力 (杭の側面と土との摩擦力) は建築物の土台に使われるような大型の杭の場合には土のせん断強度で評価できることが示されており (伊藤・前原 1986)、圧力があまりかかっていな

い地表面に近い土層の場合にはせん断強度の多くを土の内部摩擦角ではなく粘着力が担っていると考えられる。本試験で観察された土質による引き抜き強度のちがいは、乾いた砂は粘着力を発揮しないため礫混じり砂質土では引き抜き強度が下がり、一方で砂利混じり粘性土では粘土の粘着力によって引き抜き強度が上がったことが原因のひとつと考えられる。防護柵の設置地点において、アンカー杭の引き抜き強度を考慮しながら適切な製品を選択するには、土壌貫入計で測定できる堅さだけではなく土質についての観察が必要になるかも知れない。

3.3 複数アンカー杭でおさえたロープの引き上げ試験

森林総合研究所四国支所構内および今治市郊外皆伐地の2か所での、ロープ引き上げ荷重を Fig. 7 に示した。どちらの場所でも地面との隙間を大きくするほど引き上げ荷重は大きくなりロープを30 cm引き上げるまでの最大引き上げ荷重の平均値は森林総合研究所四国支所構内では $1,337 \pm 558$ N、今治市郊外皆伐地では 577 ± 168 Nを示した。ただし、すべての場合においてその時点で作用点の両隣のアンカー杭は少なくとも片方が動き始める、あるいは抜けており (Fig. 8)、それ以上に引き上げても30 cm時点までの最大荷重を越えることはなかった。四国支所構内に比べて全体にアンカー杭の引き抜き強度が小さい今治市郊外の皆伐地では (Fig. 6, Table 4)、10 cm引き上げ、および20 cm引き上げ時点において、1 m間隔と60

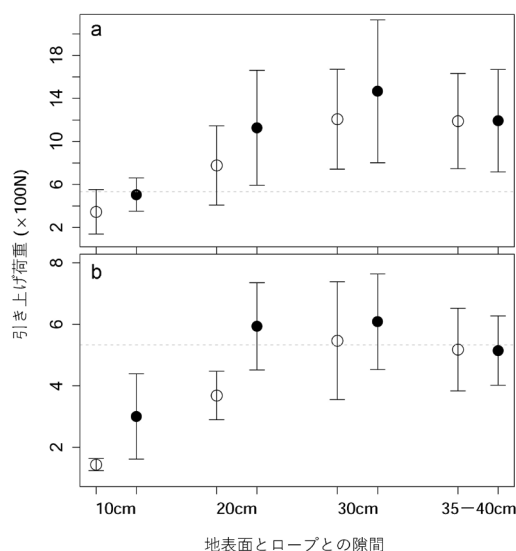


Fig. 7. 複数アンカー杭でおさえたロープの引き上げ試験の結果

a) 森林総合研究所四国支所構内 (砂利混じり粘土質造成土)、および b) 今治市郊外皆伐地 (花崗岩地帯)。○両端を固定した3 mのロープを2本 (1 m間隔) のアンカー杭でおさえた場合、および●4本 (60 cm間隔) でおさえた場合。それぞれの場所・隙間について引き上げ荷重の平均値および標準偏差を示す。それぞれのグラフで縦軸のスケールが異なることに注意 (灰色横破線については Fig. 6 の注釈を参照)。

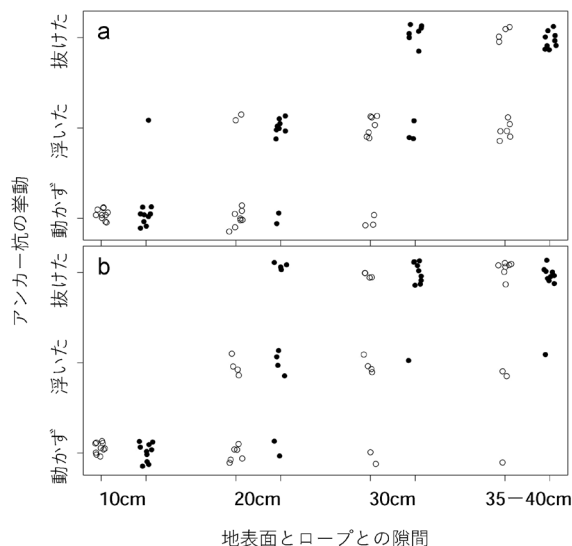


Fig. 8. 複数アンカー杭でおさえたロープの引き上げ試験での杭の挙動

ロープ引き上げ作用点の両隣に打ち込んだ2本のアンカー杭の挙動を、それぞれの場所・打ち込み間隔・地表面との隙間について10本ずつ示した。a) 森林総合研究所四国支所構内 (砂利混じり粘土質造成土)、および b) 今治市郊外皆伐地 (花崗岩地帯)。○両端を固定した3 mのロープを2本 (1 m間隔) のアンカー杭でおさえた場合、および●4本 (60 cm間隔) でおさえた場合。各点が重ならないように少しずらすして表示した。

cm 間隔でアンカー杭を打った場合の引き上げ荷重の差が大きく、20 cm 引き上げでは 1 m 間隔が 368 ± 79 N に対し 60 cm 間隔が 593 ± 142 N であった (Fig. 7b)。これに比べて、森林総合研究所四国支所構内では 20 cm 引き上げ時点での引き上げ荷重はアンカー杭打設本数によって大きく異ならなかった (Fig. 7a)。ただし、20 cm 引き上げ時点での引き上げ荷重は今治市の皆伐地よりもかなり大きく 1 m 間隔では 777 ± 369 N、60 cm 間隔では $1,127 \pm 535$ N であった。森林総合研究所四国支所構内のほうが大きな引き上げ荷重を示したと同様、引き上げ作用点の両隣に打ち込んだアンカー杭が浮き上がり抜けていく挙動についても 20 cm 引き上げ時点で見ると、四国支所構内のほうがやや抜けにくかった (Fig. 8)。10 cm 引き上げ時点ではほぼすべての杭は動かず、20 cm、30 cm と引き上げていくに従い、いずれの場所でも 1 m 間隔よりも 60 cm 間隔のほうが早くに杭が抜けることが Fig. 8 から見てとれる。

タイプ I のアンカー杭の垂直引き抜き強度は森林総合研究所四国支所構内では 691 ± 94 N、今治市郊外皆伐地では 497 ± 256 N であるので (Fig. 6a)、上記の結果をふまえるとアンカー杭の引き抜き強度が小さい場所ではアンカー杭の数を増やすことによって裾ロープの引き上げ荷重を増大させる効果がより大きいといえる。現実の再造林地では森林総合研究所四国支所構内のような良く締まった造成土でないことはもちろん、今治市郊外皆伐地で試験をおこなったような尾根筋よりもさらに土壌が緩い場所が多くあるはずなので、防護柵の裾ロープのアンカー杭を増やすことは引き上げ荷重を増大させることに有効と考えられる。

飼育個体を使った実験からイノシシが鼻先で持ち上げる力は 366 から 706 N (533 ± 115 N、 $n = 6$ 、西日本農業研究センター 2016) とされ、イノシシは地際にできた 20 cm 程度の隙間を通り抜けることができる (江口 2003)。農地に設置された金属メッシュ柵の地際部分をイノシシに持ち上げられないように、西日本農業研究センター (2016) では単管パイプを使って金属メッシュ柵の地際とアンカー杭と連結することを提案している。本試験で引き抜き強度の大きかったタイプ I やⅢのアンカー杭でも、垂直に引き抜く場合はイノシシの力に対抗しがたいといえるが、斜め 45 度に引き抜く場合には強度が上がりイノシシに対抗できる場合が増えると予想される (Fig. 6)。防護柵の上下端や控え索に使われるポリプロピレン製やポリエチレン製の三つ撚りロープの場合、破断の強度は 4 mm 径では 1.5 から 1.7 kN、6 mm 径では 3.0 から 3.9 kN ほどあり (各種製造メーカーの公表値)、アンカーの引き抜き強度やイノシシの鼻先持ち上げ力よりもはるかに大きい。現状では再造林地の防護柵の裾ロープはアンカー杭と連結されずに杭頂部でおさえられているだけだが、個々のアンカー杭の頂部を裾ロープと連結しておけば裾ロープを動物が持ち上げた際にはアンカー杭に垂直ではなく

斜め方向の荷重がかかるので、現状よりも大きな引き上げ荷重に耐えられると予想される。農地で提案された単管パイプによる補強方法は傾斜や凸凹のある再造林地では適用しにくい、アンカー杭と裾ロープを針金などで連結・固定することは実行可能であろう。入手可能な資材をうまく組み合わせながら改良を加えることによって、現状よりも強固な防護柵を実現できると考えられる。

謝辞

アンカー杭の引き抜き試験にあたって、香美森林組合および越智今治森林組合の協力を得た。この試験は森林総合研究所交付金プロジェクト 2「シカ激害地における防護柵保守の効果実証試験」の一環としておこなった。

引用文献

- 堂山 宗一郎・江口 祐輔・上田 弘則 (2016) ホンシュウジカが通り抜けられる隙間サイズの測定. Anim. Behav. Manag., 52, 171–179.
- 江口 祐輔 (2003) イノシシから田畑を守る おもしろ生態とかしい防ぎ方. 農山漁村文化協会, 149pp.
- 伊藤 圭典・前原 雅幸 (1986) 場所打ち杭の引抜き抵抗に関する実験と考察. 土木学会論文集, 376, 59–67.
- 木全 卓・工藤 庸介・桑原 孝雄・山形 俊彦・北島 弘伸・望月 政和 (2006) 温室用基礎としての斜杭の有用性に関する研究—杭長および地盤状態の違いが引き抜き特性に及ぼす影響について—. 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科学術報告, 58, 1–5.
- 小長井 信宏・宮田 典幸 (2021) シカ防護柵アンカーの材質・形状による引抜き耐力の違い. 日本森林学会大会発表データベース, 132, 402.
- 日下 昭宏・法眼 利幸 (2018) ニホンジカとイノシシの誘引餌を用いた森林防護柵の強度試験. 日本森林学会大会発表データベース, 129, 444.
- 三重県林業研究所 (2016) “スギ、ヒノキの植栽苗木をシカの食害から守るために必要なことは?”, <https://www.pref.mie.lg.jp/ringi/hp/89728000001.html>, (参照 2022-2-22).
- 日本造園学会 (2000) 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル. ランドスケープ研究, 63, 224–241.
- 西日本農業研究センター (2016) “侵入防止柵の接地部を直管パイプで補強することで、イノシシのくぐり抜けを防止できる”, https://www.naro.go.jp/project/results/4th_laboratory/warc/2016/16_055.html, (参照 2022-2-22).
- 農林水産省 (2021) 食料・農業・農村白書 令和 3 年版. 日経印刷, 375pp.
- 尾崎 真也 (2001) 兵庫県におけるニホンジカによる幼齢造林木被害とその防除. 兵庫県立森林・林業技術センター研究報告, 49, 19–23.
- R Core Team (2021) R: A language and environment for

- statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- 林野庁 (2021) 令和3年版 森林・林業白書. 全国林業改良普及協会, 391pp.
- 佐渡 靖紀・田戸 裕之 (2017) 複合獣種対応型被害防護柵の開発. 山口県農林総合技術センター研究報告, 8, 12-22.
- 酒井 敦 (2018) 皆伐・再造林地におけるシカ防護柵の実態と被害対策. 水利科学, 61, 101-113.
- 四国森林管理局 (2019) “四国森林管理局のシカ森林被害対策の取組”, https://www.rinya.maff.go.jp/shikoku/gijutu_c/sikahigaitaisaku.html, (参照 2022-2-22).
- 森林整備センター (2020) “シカ害防除マニュアル～防護柵で植栽木をまもる～”, https://www.green.go.jp/gijutsu/pdf/zorin_gijutsu/deer_pest_control_manual.pdf, (参照 2022-2-22).
- 高柳 敦・吉村 健次郎 (1988) カモシカ・シカの保護管理論に関する一試論. 京都大学農学部演習林報告, 60, 1-17.

Tests for deer-proof fence components : pole bending strength, anchor pile pull-out resistance and lifting load of lower-end rope

Tatsuya OTANI^{1)*} and Reiji YONEDA¹⁾

Abstract

Strength tests for components of deer-proof fences were conducted for pole bending, anchor pile pulling-out, and lower-end rope lifting. Although all of 7 pole products were marketed as anti-animal fence poles, the mean pole-bending strength for each product ranged from 66 N to 396 N. Two types of longer anchor piles exhibited the greatest resistances for all horizontal, diagonal, and vertical directions of pull-out tests, and anchor piles showed higher pull-out resistance in the developed clay soil than in the forest soil. The resistances of anchor pile pulling-out for diagonal direction were larger than those for vertical direction, thus we proposed improving deer-proof fences by connecting the lower-end rope and anchor pile tops so that the anchor piles receive a diagonal pulling force, increasing their resistance over receiving a vertical pulling force.

Key words : load cell, sika deer, soil penetrometer, soil property, wild boar

Received 8 April 2022, Accepted 17 May 2022

1) Shikoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* Shikoku Research Center, FFPRI, 2-915 Asakuranishimachi, Kochi, Kochi, 780-8077 JAPAN; E-mail: tatsuyao@affrc.go.jp