

気温および降水量からの地温推定
—林地における菌根性きのこの発生予測に向けて—

河合昌孝*1・今治安弥*2

Estimation of soil temperature by air temperature and rainfall
Towards predicting the emergence time of ectomycorrhizal mushrooms in forest areas.

Masataka KAWAI*1 and Aya IMAJI*2

遠隔地での菌根性きのこの発生予測に用いる地温推定を行うために、地温（地下 10 cm）と気温の関係を解析した。その結果、当日から 17 日前までの気温の加重平均値（ At_i ）と、地温の相関が非常に高いことが明らかになった。1 年間の地温の変化は、上昇期（2-7 月）と下降期（8-1 月）に分けることができ、上昇期では、地温は At_i の一次式で表され、下降期は二次式で表された。また、気温に加えて、降水がある場合は、10 日間の降水量から求められる湿り気の指数を加味することにより、推定モデルの適合度がより上昇することが示された。一方、地温と At_i の関係は年ごとに傾向が変わることから、他の要因の影響も考えられた。寒冷地においては、積雪期を除外することにより、地温は上昇期では At_i の一次式で表され、下降期では二次式で表されることが分かった。地温の観測地に近く、気象条件が似通っている観測地での気温データを用いることにより地温の推定が可能となることが明らかになった。

The relationship between soil temperature and air temperature was analyzed to estimate the soil temperature in experiment site in a mountainous region. As a result, it seemed that there is quite high correlation between weighted average of air temperature for 18 days (At_i) and soil temperature. Soil temperature changes in one year is possible to divide into rise-phase (February-July) and down-phase (August-January). The soil temperature was expressed in the linear function of At_i in rise-phase, and expressed in quadratic function of At_i in the down-phase. Better fit of estimation model was found by using the index of moisture calculated from the rainfall of 10 days when the rainfall was measured at the same time. On the other hand, the correlation ships between the soil temperature and At_i were changed from year to year. In cold district regions, the soil temperature indicated a constant value mostly in the cold period. By excluding a snow period, the soil temperature was expressed in the linear function of At_i in rise period, and down-phase showed that it's expressed in the quadratic function. It was able to estimate the soil temperature from air temperature data measured the location with similar weather condition and close to the soil temperature measurement place.

1. はじめに

森林における地温の変化は、植物の種子発芽、土壌動物の行動だけでなく、きのこの発生にも影響することが知られている。たとえば、菌根性きのこであるマツタケについては、衣川が京都府亀岡市の試験林において、地下 5 cm の地温が 19°C 以下に下がると原基形成が起こることを示

し¹⁾、成松は、寒冷地ではマツタケの原基形成刺激温度は 19°C より低いことを示している²⁾。また、岩手県岩泉町では、子実体発生時期において地下 10 cm の日平均地温が 13 ~ 18°C の箇所でマツタケが多く発生するようになり、15°C の箇所では最も多く子実体が発生するとしている^{3, 4)}。マツタケ以外にも菌根性きのこの中には高額に取引がなされるものもあり、山間地域の重要な収入源の一つとなっ

*1 現 奈良県 環境森林部 フォレストアカデミー

*2 元 奈良県森林技術センター

ている。そうした菌根性きのこの多くは発生時期が地温に依存していることが知られている⁵⁾。このように森林における地温の変化は、マツタケをはじめとする市場価値の高い菌根性きのこの発生時期を推定するうえで、重要な因子と思われる。

近年の測定機器の発達により、地温の測定は容易になってきているが、測定地点が遠隔地である場合、データの回収と確認には時間を要する。そこで、アメダスのような入手容易な気象データを活用して林地の地温を推定できれば、直接地温測定をすることなく菌根性きのこの発生時期を予測できるようになる。また、過去の地温変化も推定できるため、長年にわたる子実体の発生記録があれば子実体発生と地温の関係についても解析が可能となる。古川らはマツタケ試験地の地温データを基に、近接のアメダス観測所の気温データとの相関から、地温測定開始以前の地温変化を推定し、測定開始後の地温の推移との比較を行っているが⁶⁾、気温と地温が高い相関を示す期間が短いため、推定した期間は限られている。また、清水と石塚は、林地の地温測定の欠測値の推定を気温測定値から行っている⁷⁾。原も、気温および日射量のデータから地温の推定を行っているが⁸⁾、フーリエ変換を行うなど多少複雑なモデルとなっている。このように気温から地温を推定することはしばしば行われてきたが、推定できる期間が限られていたり、推定モデルが複雑であったりした。

今回、日平均気温と日降水量のデータを用いた、比較的単純なモデルで日平均地温を推定したのでその詳細を報告する。

2. 分析方法

2.1 日平均地温と日平均気温の関係

地温データは、奈良県吉野郡西部の広葉樹林地内(標高約800m)で、2019年6月から9月にかけて測定した地下10cmの温度を用いた。測定は温度ロガーTR-5i(株式会社ティアンドデイ)で30分から1時間おきに測定した地温の1日分を平均して日平均地温とした。日平均気温は試験地に最も近いアメダスの観測点である「高野山」(和歌山県伊都郡高野町高野山 標高795m(解析当時))のデータ(気象庁(WEB))⁹⁾を用いた。以下、本文中では、日平均地温を地温、日平均気温を気温と記す。

地温の変化の要因のひとつとして地表からの熱伝導が考えられる。そのため、当日の気温が一番影響するが、それ以前の気温も地温に影響を与えていると考えられるので、次式(1)により気温を加重平均し、小数点第2位を四捨五入した値を気温の指数 At_i とし、地温との相関を調

べた。

$$At_i = \frac{\sum_{n=0}^k (r_1^n \times T_n)}{\sum_{n=0}^k (r_1^n)} \quad \text{式 (1)}$$

At_i : 気温の指数 T_0 : 当日の気温 T_n : n 日前の気温 r_1 : 重みづけ係数 ($0 \leq r_1 \leq 1$) k : 日数

次いで、式(1)において、 r_1 を0.5から1まで変化させて6日前までの値を用い At_i を算出し、決定係数(以下 R^2 と表す)が最も高くなる r_1 の値を求めた。また、求められた r_1 の値を用い、 n の値を変化させ、 R^2 が最も高くなる n の値を求めた。

2.2 年間の地温と気温の関係

分析には、奈良県森林技術センターの構内(奈良県高市郡高取町吉備1 標高105m)において、1996年から2018年にかけて記録された、日平均地温(地下10cm)、日平均気温、日降水量の観測値のうち、欠測値がない2014年12月から2015年12月までのデータを用いた。

2.1の結果より $r_1=0.7$ 、 $n=17$ とし、式(1)により At_i を算出し、年間の地温と At_i の関係を調べ、地温の上昇期と下降期に分け回帰式を算出した。

2.3 地温と気温・降水量の関係

奈良県森林技術センター構内において、1996年から2018年にかけて記録された、日平均地温(地下10cm)、日平均気温、日降水量の観測値を使用した。

$r_1=0.7$ 、 $n=17$ として、式(1)により At_i を算出した。

また、降雨の影響を見る指数は次式により計算し、小数点以下第2位を四捨五入し湿り気の指数 Rf_i とした。

$$Rf_i = \sum_{n=0}^k (r_2^n \times P_n) \quad (Rf_i \geq 100 \text{ の時 } Rf_i = 100) \quad \text{式 (2)}$$

Rf_i : 湿り気の指数 P_0 : 当日の降水量 P_n : n 日前の降水量 r_2 : 重みづけ係数 ($0 \leq r_2 \leq 1$) k : 日数

At_i と、 r_2 を0.1から0.8まで変化させ $n=9$ として計算した Rf_i を用い、地温との重回帰分析を行い、決定係数(R^2)と赤池情報量規準(AIC)により r_2 を求めた。また、この時の r_2 を用い n を9から17まで変化させて算出した Rf_i と At_i を用いて地温との重回帰分析を行い、 R^2 が最も高くなりAICが最も小さくなる時の n を求めた。

また、大量の雨が降り土壌浸透能を超えた場合、雨水は地中にしみ込むことなく地表を流れてしまうことから、 $Rf_i \geq 100$ の時は $Rf_i = 100$ とした。

なお、重回帰分析は2.2の結果から、上昇期は1次式、下降期は2次式で行った。

2.4 地温推定モデルからの推定値と実測値との差

奈良県森林技術センター構内において、1996年から2018年にかけて記録された、日平均地温(地下10cm)、日平均気温、日降水量の観測値を使用した。式(1)により A_{ti} を、式(2)により R_{fi} を算出し、全観測期間のデータを用いて推定するモデル(全体式)、欠測値のない2013年2月1日～2014年1月31日、2014年2月1日～2015年1月31日、2015年2月1日～2016年1月31日の観測値を用いて推定するモデル(それぞれ2013年式、2014年式、2015年式)、2013年2月1日～2016年1月10日のデータを用いて算出するモデル(13-15年式)、年ごとに推定するモデル(年ごと)の、6つのモデルにより地温を推定し、地温の実測値と各モデルの推定値との差について解析した。

2.5 寒冷地の地温と気温の関係

奈良県のほとんどの地域では長期間雪で覆われることがないが、標高の高い地域では冬季に雪で覆われることもある。地温は気温の変化に影響を受けると考えられるが、地面が雪で覆われると、雪の断熱効果により気温の変化が地温変化へ反映されない可能性がある。そこで、冬季地面が雪で覆われる可能性の高い寒冷地での地温と気温の関係を調べた。分析には、帯広市が公開している、1996年から2019年までの帯広市農業技術センター構内(帯広

市川西 標高約100m)で観測している地下10cmの地温と気温の観測データ(帯広市(WEB))¹⁰⁾を用い、気温から A_{ti} を計算し地温との関係を調べた。

2.6 遠隔地の気象データからの地温の推定

地温データは奈良県森林技術センター構内において、1996年から2018年にかけて記録された、日平均地温(地下10cm)を用いた。遠隔地のデータとしては、気象庁が公開している、奈良(奈良市東紀寺町 標高102m(解析当時))、大宇陀(奈良県宇陀市大宇陀下竹 標高349m(解析当時))、五條(奈良県五條市三在町 標高190m(解析当時))、高野山の各観測地における気温の、1996年から2018年までの観測値(気象庁(WEB))⁹⁾を用いた。式(1)により A_{ti} を、式(2)により R_{fi} を算出し重回帰分析し地温を推定した。

すべての統計解析は、統計ソフトR ver.2.6.2(R Core Team 2018)で行った。

3. 結果と考察

3.1 地温と気温

予備解析資料として用いた奈良県吉野郡西部の広葉樹林地内の地温と高野山の気温の関係は図1のとおりであり、決定係数 $R^2=0.8635$ と高い相関を示した。一方、地温の変化は当日の気温が一番影響するが、それ以前の気温の影響も考えられる。そこで、(1)式において、重み

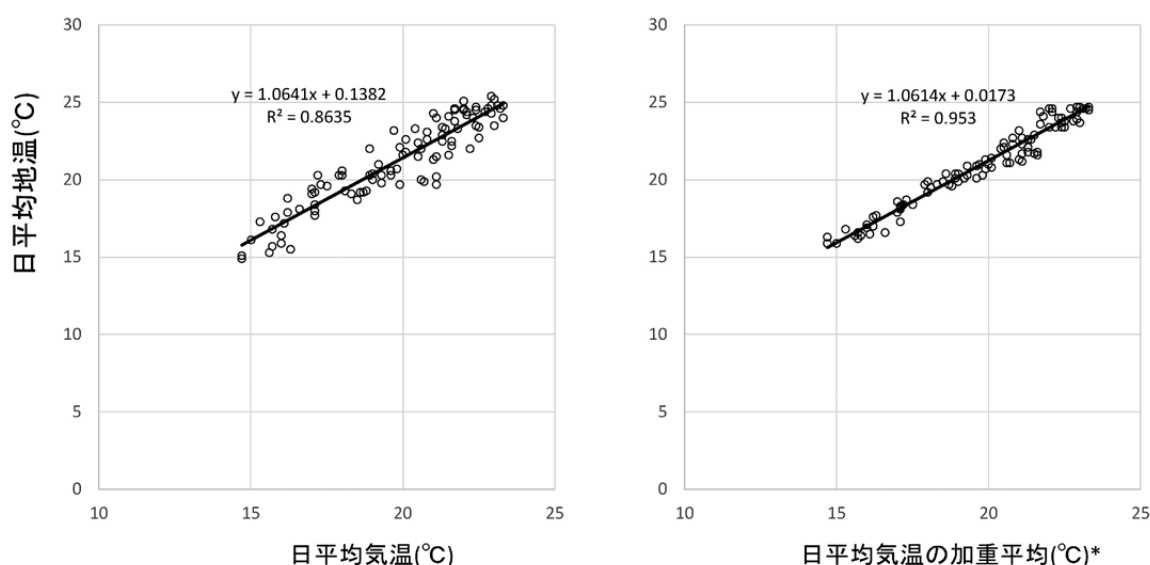


図1 奈良県吉野郡西部の広葉樹林地内の日平均地温と高野山の日平均気温の関係

* : 重み付け係数を0.7とした時の18日間の加重平均

づけ係数 r_1 を 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 および 1 とし、7 日間の平均としたところ、気温の指数 At_i と地温はそれぞれ非常に高い相関を示し、 R^2 はそれぞれ 0.9316、0.9409、0.9453、0.9431、0.9361 および 0.9238 であり、 $r_1=0.7$ の時に最も高い相関を示した。そこで、以後は $r_1=0.7$ とし解析を進めた。

次に加重平均を求める期間を検討した。

r_1 を 0.7 に固定して、平均する期間 ($k+1$ 日) を 5 から 19 日間 ($4 \leq k \leq 18$) で計算したとき、 At_i と地温の相関時の R^2 は、それぞれ 0.9311、0.9386、0.9431、0.9453、0.9479、0.9496、0.9508、0.9516、0.9519、0.9518、0.9525、0.9526、0.9528、0.953 および 0.953 であり、日数が増えるに従い高い相関を示したが、17 日で頭打ちとなった。 k が大きくなると r_1 は小さくなる。また、 At_i は小数点第 2 位を四捨五入しているため、 k がある一定数以上になるとそれ以上変化しなくなる。今回は値が定常状態になった $k=17$ (18 日間の加重平均)を用い、 At_i を算出し解析を行った。

3.2 年間の地温と気温の関係

次に年間を通じての At_i と地温の関係を見るために、奈良県森林技術センターの気象観測データのうち、欠測値のない 2014 年 12 月 15 日から 2015 年 12 月 31 日の観測値を用いた。2015 年の気温と地温、 At_i と地温の散布図は図 2 のとおりである。気温と地温ではアーモンド形に分布しているが、 At_i と地温では、2 つの曲線に分かれるように見える。そこで、一方の曲線を上昇期、他方を下降期として解析した。地温は 7 月下旬から 8 月上旬に最高値となり、1 月下旬から 2 月上旬に最低値を記録することから、2 月から 7 月までを地温の上昇期、8 月から 1 月まで

を気温の下降期としそれぞれの期間での At_i と地温 (Gt) の関係を調べた。

その結果、図 3 に示すように上昇期は直線、下降期は 2 次曲線の当てはまりが良いと考えられ、

$$\text{上昇期: } Gt = 0.39592 + 0.86191 \times At_i$$

(自由度調整後の $R^2=0.9873$)、

$$\text{下降期: } Gt = 0.3469820 + 1.4392607 \times At_i - 0.0195436 \times At_i^2$$

(自由度調整後の $R^2=0.9862$)

の式で近似できた。

3.3 地温と気温・降水量の関係

湿り気の指数 Rfi 計算時の r_2 を変化させたときのモデルの適合度は、表 1 のとおりであった。上昇期では、 r_2 の値が大きくなるほど AIC が小さくなり R^2 も大きくなった。一方、下降期では $r_2=0.7$ で AIC が最小で、 R^2 が最大となった。上昇期と下降期で最適な r_2 の値が異なったが、上昇期のモデルにおいて r_2 が 0.6 から 0.9 の範囲では R^2 の値に著しい違いがないことから、下降期での最適モデルである $r_2=0.7$ を採用した。

Rfi 計算時に $r_2=0.7$ と固定し、計算する日数を変化させたときのモデルへの適合は表 2 のとおりであった。上昇期では、12 日間で AIC が最も小さくなったが、 R^2 の値は 9 日間から一定値であった。また、10 日間と 12 日間の AIC の差は 0.6 でありそれぞれのモデルに大きな違いがないと考えた。下降期においては、日数が増えるほど AIC は小さくなったが、 R^2 の値はすべて一定であった。また、10 日間と 15 日間の AIC の差は 1.58 であった。これらのことから、 Rfi を計算する日数は 10 日間が適当とした。

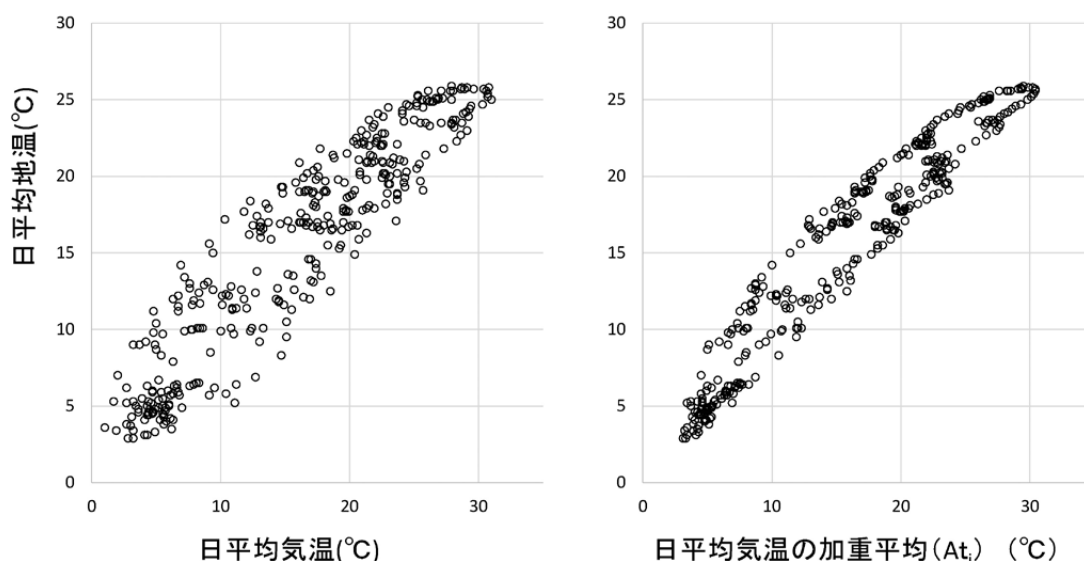


図2 奈良県森林技術センターの日平均地温と日平均気温の関係

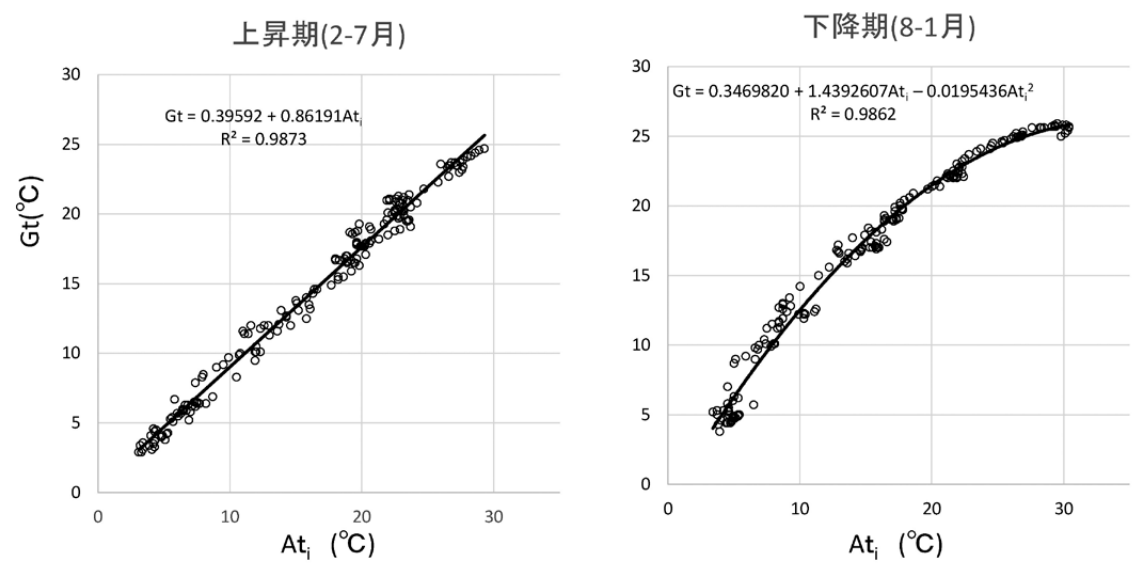


図3 日平均気温の加重平均(At_i)と日平均地温(Gt)の関係

表 1 湿り気の指数 Rf_i 計算時の r_2 を変化させたときのモデルの適合度

重みづけ係数 r_2	上昇期		下降期	
	AIC	R^2	AIC	R^2
0.1	10257.01	0.9809	10484.81	0.9855
0.2	10247.41	0.9809	10477.68	0.9855
0.3	10234.42	0.9810	10470.56	0.9856
0.4	10216.78	0.9811	10463.70	0.9856
0.5	10193.04	0.9812	10456.50	0.9856
0.6	10161.62	0.9814	10450.08	0.9856
0.7	10123.04	0.9816	10446.77	0.9856
0.8	10085.10	0.9817	10448.95	0.9856
0.9	10074.45	0.9818	10457.11	0.9856

推定式

上昇期： $Gt^* = a + b \times At_i + c \times Rf_i$

下降期： $Gt = a + b \times At_i + c \times At_i^2 + d \times Rf_i + e \times Rf_i^2$

*： Gt ：日平均地温

表 2 湿り気の指数 Rf_i 計算時に $r_2=0.7$ と固定し、日数を変化させたときのモデルへの適合

日数	上昇期		下降期	
	AIC	R^2	AIC	R^2
2	10232.17	0.9810	10465.70	0.9856
3	10194.50	0.9812	10459.39	0.9856
4	10165.67	0.9814	10454.96	0.9856
5	10146.84	0.9814	10451.36	0.9856
6	10135.76	0.9815	10449.28	0.9856
7	10129.88	0.9815	10448.04	0.9856
8	10126.55	0.9815	10447.79	0.9856
9	10124.35	0.9816	10447.37	0.9856
10	10123.04	0.9816	10446.77	0.9856
11	10122.59	0.9816	10446.19	0.9856
12	10122.44	0.9816	10445.81	0.9856
13	10122.53	0.9816	10445.48	0.9856
14	10122.53	0.9816	10445.37	0.9856
15	10122.69	0.9816	10445.19	0.9856

推定式

上昇期： $Gt^* = a + b \times At_i + c \times Rf_i$ 下降期： $Gt = a + b \times At_i + c \times At_i^2 + d \times Rf_i + e \times Rf_i^2$ *： Gt ：日平均地温

上昇期と下降期に分け、地温 (Gt) と At_i 、 Rf_i の重回帰分析を行った結果を表 3、4 に示す。上昇期、下降期とも推定式における Rf_i の係数は小さく地温に及ぼす影響は小さいと考えられた。しかし推定式に Rf_i を加味するモデルと加味しないモデルを比較すると、上昇期では加味するモデルの AIC が 10123.04、加味しないモデルの AIC が 10287.67、下降期ではそれぞれ 10446.77、10502.01 であり、加味するモデルの方がより適合していた。

3.4 地温の実測値と各モデルの推定値との差

地温の実測値と推定値との差は表 5 のとおりであった。

上昇期における実測値と全体の式との差および年ごととの差の平均はいずれも 0 であった。しかし標準偏差は全体式が 0.91 であるのに対し、年ごととの差では 0.71 と、

全体式での推定よりもより適合していると思われる。下降期においても平均がそれぞれ 0、標準偏差が全体式 0.88、年ごと 0.75 と同様の傾向を示している。また、実測値と 2013 年式、2014 年式、2015 年式および 13-15 年式との差の平均は、それぞれ 0.65、0.47、0.51 および 0.52 と正の値を示している。また下降期も同様に正の値であり、実測値よりも低く推定している。推定式では気温の要因が大きい、これらのことから 2013 年から 2015 年は、気温に対し地温が低くなる期間であったと推定される。また、全体式と年ごとの比較により、各年により相関の様子が微妙に異なることがうかがえ、気温と降水量以外に地温の変化に影響する要因があると考えられ、この要因が明らかになれば、より正確な推定が可能と思われる。

表 3 上昇期の地温(Gt)の推定式*の各係数

係数	推定値	標準誤差	t 値	Pr(> t)
a	1.427688	0.032691	43.673	<2e ⁻¹⁶
b	0.821881	0.001841	446.362	<2e ⁻¹⁶
c	0.011312	0.001329	8.513	<2e ⁻¹⁶

*推定式: $Gt = a + b \times At_i + c \times Rf_i$
 自由度調整後の R^2 : 0.9812

表 4 下降期の地温(Gt)の推定式*の各係数

係数	推定値	標準誤差	t 値	Pr(> t)
a	0.44906081	0.04889486	9.184	< 2e ⁻¹⁶
b	1.51999459	0.00771677	196.973	< 2e ⁻¹⁶
c	-0.02194939	0.00023818	-92.153	< 2e ⁻¹⁶
d	-0.00979293	0.00164564	-5.951	0.00000000289
e	0.00005351	0.00001415	3.782	0.000158

*推定式: $Gt = a + b \times At_i + c \times At_i^2 + d \times Rf_i + e \times Rf_i^2$
 自由度調整後の R^2 : 0.9856

表 5 地温の実測値と推定式から求めた値との差 1

推定式	上昇期		下降期	
	差の平均値	差の標準偏差	差の平均値	差の標準偏差
全体式	-0.00	0.91	0.00	0.88
年ごと	-0.00	0.71	0.00	0.75
2013 年式	0.65	0.93	0.19	1.04
2014 年式	0.47	0.98	0.39	0.93
2015 年式	0.51	0.96	0.35	0.97
13-15 年式	0.52	0.95	0.45	0.92

差 = 実測値 - 推定値

3.5 寒冷地の地温と気温の関係

図4に帯広市川西における At_i と地温 (Gt) の関係を示す。

上昇期、下降期とも低温域で、地温 (Gt) は At_i の値に関係なくほぼ横ばいである。奈良県森林技術センターでは冬季の積雪はほとんどないが、帯広市では冬季は地表が雪に覆われる。地表面温度は積雪に大きく影響され、盛岡市の事例では、積雪深が 1 cm 以上あると積雪深の大きさにかかわらず、地表面温度は約 0°C である⁸⁾。このように、地表が雪に覆われた場合、積雪が断熱効果を示し地温に対する気温の影響が小さくなると思われる。帯広市が公開しているデータには積雪の項目がないが、最寄りのアメダス(帯広)によると、1996年～2016年においては、降雪の少ない年の12月上旬を除き、12月～3月までは地表面は積雪で覆われている。そこで、12月から3月までのデータを除外して相関を調べたところ、上昇期では1次式で、下降期は2次式で回帰でき、それぞれの自由度調整後の R^2 も 0.9351 および 0.9748 と非常に高い相関を示した(図5)。このことから、冬季に積雪で長期間地表が覆われる寒冷な地域では、積雪期を除いて解析することにより地温を推定することができると考えられる。

3.6 遠隔地の気象データと地温の関係

これまでの解析の結果、降水量データを用いた Rf_i を、計算式に加味することにより、 At_i のみで推定するよりもより適合することを示した。しかし、地温と気温の観測地が離れている場合、地温の観測地に降雨があっても気温の観測地では降雨が無い、またはその反対の事象が生じる。このことから、気温観測地での降水量データを用いることは適当ではないと判断し、 At_i のみを用いて地温の推

定モデルを作成した。

地温の実測値と各気象観測点のデータを基にした推定値との差の平均値と標準偏差は表6のとおりである。

上昇期における差の平均値は、大宇陀の -0.10 を除き 0 である。下降期においても大宇陀の 0.01 を除き 0 であることから、大宇陀の観測値を用いた推定では、上昇期はやや高めに推定し、下降期はわずかに低めに推定していると考えられる。それに対し、奈良と五條の観測値からの推定は全体式と同じような傾向を示している。一方、高野山に関しては、上昇期、下降期とも標準偏差が他の推定式よりも大きく、推定の精度が低いと思われる。奈良県森林技術センターからの距離は、五條(約 9km) < 大宇陀(約 14km) < 奈良(約 25km) < 高野山(約 31km) である。奈良県森林技術センター、五條、奈良の観測地が盆地にあるのに対し、高野山の観測地は奈良県森林技術センターから距離も遠く、山間部であり環境が異なることから推定の精度が落ちたのではないと思われる。また、大宇陀は高原性の気候であり、盆地性の気候である奈良県森林技術センターとは気温変化の傾向が異なることから、差の平均が 0 でなかったと考えられる。地温は観測当日から 17 日前までの気温の変化に影響されることが示されたことから、地温推定には、年間を通して観測地の気温と似たような変動をする地域の気温データを用いるのがよいと思われる。そのため、地温の観測地に近く、かつ気象条件(例えば盆地性なのか、高原性なのか、山間部なのか、海岸性かなど)が似通っているアメダス観測点の気温データを用いることにより、比較的正確に地温が推定できると考えられる。

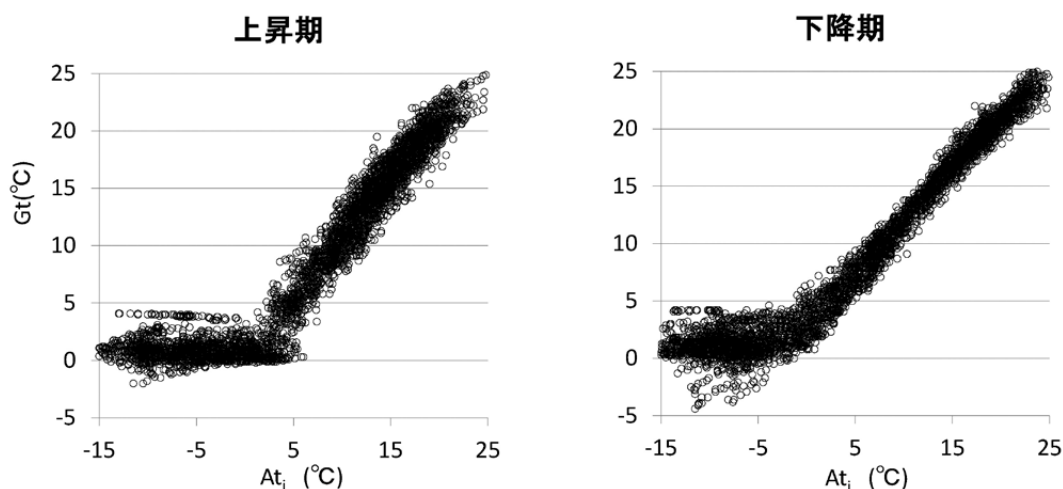


図4 帯広市の日平均気温の加重平均(At_i)と日平均地温(Gt)の関係(1)
全データのプロット

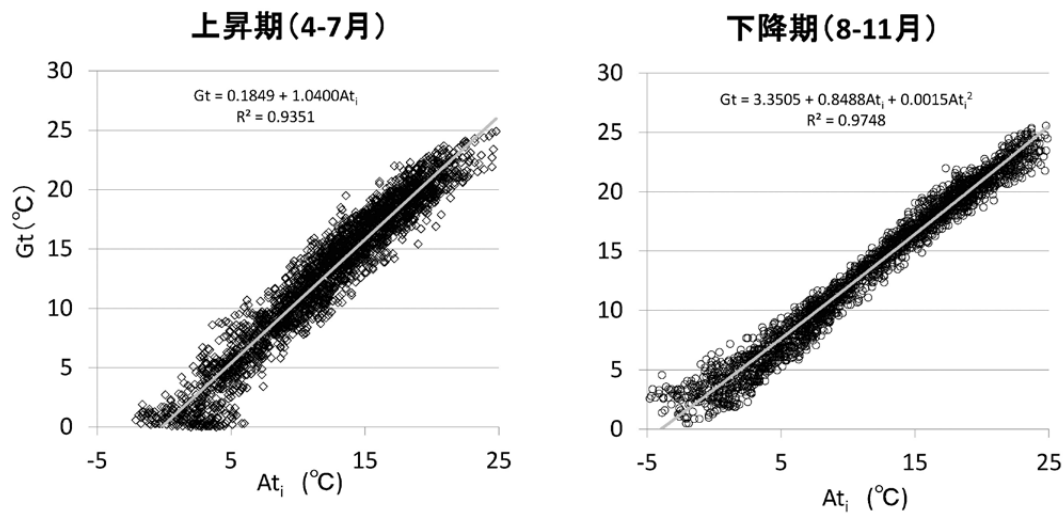


図5 帯広市の日平均気温の加重平均(At_i)と日平均地温(Gt)の関係(2)
12月から3月のデータを除外したプロット

表 6 地温の実測値と推定式から求めた値との差 2

推定式*	上昇期		下降期	
	差の平均値	差の標準偏差	差の平均値	差の標準偏差
五條	0.00	0.86	0.00	0.92
大宇陀	-0.10	0.87	0.01	0.94
奈良	0.00	0.94	0.00	0.90
高野山	0.00	1.00	-0.00	1.09

差＝実測値－推定値
＊：各観測地点のアメダス気温データより作成

古川らは、マツタケ試験地の過去の地温を、試験地に一番近いアメダスの気温データの内、試験地の地温との相関が高い期間を抽出して推定している⁶⁾。しかし、高い相関が得られる期間は短いため、推定できる期間も限られたものとなっている。一方、今回の推定法では積雪期以外の通年で地温推定が可能である。今回の推定方法が活用できれば、より高い精度でより長期間地温が推定でき、子実体発生状況の解析にも活用できる可能性がある。今回は、気温と地下 10 cm の地温の関係を論じ詳細を示さなかったが、地下 5 cm の地温にも同様の推定式が利用でき

た。また、WEB によりアメダスデータは前日までの平均気温を検索できる。この推定式を用いることにより、遠隔地の前日までの地下 5 cm および 10 cm の地温を推定できることから、地温の変化から子実体発生の時期を推定するのに役立つことが期待される。

また、1 年間の地温の測定値があれば、WEB 等で入手可能な気温データを用いて、その地点の過去の地温の推定が可能であり、いろいろな分野での利用が可能な手法と考える。

4. まとめ

- (1) 次式で求められる、気温の 18 日間の加重平均値 At_i と、地温の相関が非常に高いことが明らかになった。

$$At_i = \frac{\sum_{n=0}^{17} (0.7^n \times T_n)}{\sum_{n=0}^{17} 0.7^n}$$

T_0 : 当日の気温 T_n : n 日前の気温

- (2) 1 年間の At_i と地温の変化をプロットすることにより、上昇期 (2-7 月) と下降期 (8-1 月) に分かれることが明らかになった。上昇期では、地温は At_i の一次式で表され、下降期は二次式で表されることが分かった。また、同時に降水量が測定される場合は、次式で求められる湿り気の指数 Rf_i を加味することにより、よりモデルの適合度が上がることが示された。

$$Rf_i = \sum_{n=0}^k (r_2^n \times P_n) \quad (Rf_i \geq 100 \text{ の時 } Rf_i = 100)$$

P_0 : 当日の降水量 P_n : n 日前の降水量

- (3) 地温と気温 (At_i) の相関は年ごとに傾向が変わり、気温に対し地温が低めになる年、高めになる年があることが分かった。この原因は不明であるが、関係する要因が明らかになれば、より精度の高い推定が可能になると思われる。
- (4) 寒冷地においては、低温域では At_i の値と関係なく地温は横ばい状となったが、積雪期を除外することにより、地温は上昇期において At_i の一次式で表され、下降期では二次式で表されることが分かった。
- (5) 地温の観測地に近く、気象条件が似通っていると考えられる観測地での気温データを用いることにより、離れた場所の気温データより地温の推定が可能となった。このことにより、遠隔地で頻繁にデータ回収ができない地域での、前日までの地温推定が可能となった。以上 (1) ~ (4) の結果を用いることにより、より高い精度でより長期間地温が推定でき、子実体発生状況の解析にも活用できると考える。

また、この手法は子実体発生予測以外の分野にも応用可能であると期待される。

謝辞

論文を執筆するにあたり、気象データの使用を許可いただきました帯広市に感謝いたします。

引用文献

- 1) 衣川堅二郎：マツタケの発生に関する生態的研究－成長曲線とその解析－. 大阪府立大学紀要, 農学・生物学, 14, 27-60 (1963)
- 2) 成松真樹：寒冷地域におけるマツタケ子実体原基形成刺激温度の推定. 第 116 回 日本森林学会大会要旨集, 116, 196 (2005)
- 3) 吉村文彦：必ず成功する岩泉式マツタケ山のつくり方. 岩手, 岩泉マツタケ研究所, 2000.
- 4) 吉村文彦：ここまで来た！マツタケ栽培. 東京, (株) トロント, 2004.
- 5) 堀越孝雄・鈴木彰：きのこの一生. 東京, 築地書館, 1990.
- 6) 古川仁, 増野和彦, 竹内嘉江：地球温暖化に適応したマツタケ発生林施業方法. 長野県林業総合セ研, 30, 87-100 (2016)
- 7) 清水貴範, 石塚成宏：気温データにおける地中 10 cm の地温データの補完法の検討. 九州森林研究, 56, 237-238 (2003)
- 8) 原道宏：気象データから地温を推定する試み. 計測自動制御学会 東北支部第 300 回研究集会 (2016.2.19), 資料番号 300-1 (2016)
- 9) 気象庁 (WEB)：過去の気象データ・ダウンロード. <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (アクセス 2023.3.13)
- 10) 帯広市 (WEB)：帯広市 気象情報. <https://www.agw.jp/obihiro/comment.html> (アクセス 2023.3.13)

(2025 年 4 月 24 日 受理)

〈再 録〉

ジカルボン酸処理木材の床暖房対応フローリングとしての性能評価

岩本頼子 増田勝則

木材工業, 79 (12), 507-512 (2024)

ジカルボン酸処理材について、床暖房用床材としての利用の検討を目的に、実際に床材として敷設して性能を評価する、簡易床暖房試験を行った。

ジカルボン酸処理したスギ辺材板目板（厚さ 15mm×幅 110mm×長さ 960mm）9 体と、繊維方向にエンドマッチングした同形状の無処理材 9 体について、それぞれ厚さ 12mm の床材形状に加工、片面塗装したものを試験に供した。

ジカルボン酸処理は、コハク酸（SA）とアジピン酸二アンモニウム（DA）の配合比を 2：1、薬剤濃度を 0.8mol/L とした薬液を試験体に注入した後、乾燥し、最終加熱温度を 105℃とした。処理試験体および無処理試験体を、それぞれ 9 体ずつ床暖房ユニット上に固定して敷設し、80℃の温水を 1 ヶ月以上連続通湯した。その結果、処理によって試験体間の隙間の発生量が大幅に低減し、段差や反りも低減することが実証された。無垢のスギ板目板においても、本処理によって高い寸法安定性が発現し、床暖房用床材としての利用が期待できることがわかった。

