

北海道中札内村の畑圃場における熱収支、 地温および土壌水分の変化

—測定結果を中心として—

石渡輝夫*・小林信也*

Changes of Heat Balance Components, Soil Temperature and Soil Water
Suctions at the Upland Field in Nakastsunai village, Hokkaido

—Mainly about the Observed Results—

Teruo ISHIWATA* and Nobuya KOBAYASHI*

* Civil Engineering Research Institute of Hokkaido, Independent Administrative Institution,
Hiragishi 1-3, Toyohira-ku, Sapporo 062-8602

Abstract

At the upland field in Nakasatsunai village, Hokkaido, heat balance components, soil temperature, and soil water suctions were measured during cultivating periods over ten years. The following results were gained :

1) From the results of the monthly average of heat balance components and soil water suctions, soil moisture for the growth of upland crops decreased or became deficient in late May and June, and there was a surplus from August.

2) The amounts of evapo-transpiration of the monthly average were 3.1 in late May, 3.6 in June, 3.0 in July, 2.7 in August, 1.9mm d^{-1} in September and early October.

3) In early June and early July, the ratio of soil heat flux during the daytime to net radiation with wet soil condition on a sunny day was more than that with dry soil. In early June, the ratio of latent heat flux during the daytime with wet soil on a sunny day was about 50% and somewhat less than that with dry soil. In early July, the ratio with wet soil on a sunny day was about 80% and more than that with dry soil.

4) In early July, though the range of soil temperature at 1cm depth with dry soil on a sunny day was more than that with wet soil, the range at 5 cm depth with dry soil was less than that with wet soil.

5) Numerical analysis of the changes of soil temperatures with wet and dry soil conditions should be carried out to clarify which is better for the raising of the plow layer temperature in early cultivating periods.

Key words : heat balance components, soil temperature, soil water suction, evapo-transpiration

1. はじめに

北海道十勝地方では大規模な畑作が営まれているが、高緯度に位置するため冬季に日射量は少なく平均気温は

零下となる。また、晩夏から秋期の雨が多いため、農作業への支障や湿害を来すだけでなく、冬季に土壌は凍結する（(財)日本気象協会北海道本部, 1991）。したがって、農作業が始まる春先は土壌の融凍後のため、地温が

* 独立行政法人北海道開発土木研究所 〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3

キーワード : 熱収支項, 地温, 土壌水分, 蒸発散

低いだけでなく土壌水分も耕種管理にとって過剰なことが多い。このため、耕作のために速やかな地温上昇だけでなく、適期の農作業のためにも土壌中の余剰水の排除が望まれている。一方、作物の生育盛期である晩春から初夏にかけては降水量が少なく、かなりの区域で畑地かんがい実施あるいは計画されている。

ところで、土壌水分と地温は相互に関連しており、土壌水分が多いと熱伝導率だけでなく熱容量も大きくなる(例えば、内嶋善兵衛, 1982)。土壌中の温度の伝わりやすさを示す温度拡散率(熱伝導率/熱容量)は土壌水分の増加とともにある程度まで増加し、その後は減少することが知られている(例えば、八幡敏雄, 1975)。このため土壌が乾燥している時には温度拡散率も小さく温度は伝わりにくい。このような土壌物性から圃場での観測結果を検討解析することは適正な耕種管理のために重要なことと考えられる。

北海道十勝支庁管内中札内村の畑圃場での農耕期間の熱収支、地温及び土壌水分の10カ年にわたる観測データを蓄積したのでその特徴を上述の十勝地方の気象や土壌温度と土壌水分の関係に関連付けて報告する。なお、本報告の一部は既に発表している(Ishiwata and Kobayashi, 1995)。

2. 調査地点と調査方法

2.1 調査地点、土壌および栽培作物

調査圃場は北海道十勝支庁管内中札内村の畑地(北緯42度41分, 東経143度07分)で、土壌は粗粒質な褐色低地土(U. S. Soil Taxonomy : Fluventic Distrochrept)である。土壌の理化学性を表-1に示した。深さ60cm以下は砂礫層からなり、圃場の排水性は良好であった。

観測圃場から26km北に位置する帯広測候所での30年間の月別平均気温は12月~3月まで零下となり、1月に最低値で-8.2℃, 8月に最高値で19.9℃を示す((財)日本気象協会北海道本部, 1991)。この地域の積雪量は少ないので土壌は毎冬に凍結する。

各年の試験圃場での栽培作物、播種時期あるいは移植

時期と収穫時期を表-2に示した。

2.2 観測内容および観測年

観測項目、その観測機器および観測年は以下のとおりで、佐久間ら(1975)の方法に準じた。

(1) 熱収支: 次式の熱収支法による。1983~1992年。

$$Rn = H + IE + G$$

純放射量 (Rn): 純放射計による。

地中熱流量 (G): 深さ1cmに埋設した地中熱流板による。

顕熱伝達量 (H) および潜熱伝達量 (IE): 高さ75cmと150cmに設置した乾球温度計及び湿球温度計からボーエン比を用いて算出した。

(2) 蒸発散量 (ET): 次式を用いて計算した。

$$ET \text{ (mm d}^{-1}\text{)} = 10 \times IE / (597.3 - 0.6 \times t)$$

ここで、tは地表面温度である。

(3) 地温: 深さ1, 5, 20, 50cmに銅-コンスタンタン熱電対を用い測定した。1983~1992年。

(4) 土壌水分張力: 深さ5, 15, 25, 35, 45cmに埋設したテンシオメータによる。1983~1991年。なお、

表2 調査期間中の栽培作物と作付け時期

Table 2 Cultivated crops and periods of the research field

年	作物	播種(移植)時期*	収穫時期
1983	テンサイ	4月下旬	10月中旬
1984	テンサイ	4月下旬	10月中旬
1985	アズキ	5月中旬	9月中旬
1986	テンサイ	4月下旬	10月中旬
1987	テンサイ	4月下旬	10月中旬
1988	アズキ	5月中旬	9月中旬
1989	テンサイ	4月下旬	10月中旬
1990	サイトウ	5月下旬	9月中旬
1991	バレイショ	4月下旬	8月下旬
1992	テンサイ	4月下旬	10月中旬

*: テンサイの場合は移植時期

表1 調査地土壌の理化学性

Table 1 Physico-chemical properties of the research field

層位	深さ (cm)	腐植含量 (kg kg ⁻¹)	土性	乾燥密度 (Mg m ⁻³)	固相率 (m ³ m ⁻³)
Ap1	0~30	0.045	L	1.03	0.40
II A	30~49	0.088	L	0.88	0.33
III A	49~60	0.056	SL	0.88	0.33
IVC	60~100+	0.029	GS	1.12	0.41

100+: 深さ100より深くまでIVC層が存在

本調査は畑地かんがい調査の一環として行われたため、畑地かんがいの必要性が低くなる9月以降の土壌水分張力は原則として測定されなかった。

- (5) 気温：高さ150 cmの乾球温度計の値を用いた。
- (6) 日降雨量(R)：帯広測候所の降雨量の値を使用した。

各年の熱収支、地温及び土壌水分張力の観測月日を図-1に示した。無観測の日には観測機械が故障していた期間や耕種管理のため機器を撤収した時含まれる。

3. 結果と考察

3.1 10カ年の月別平均値

5月の観測は下旬に、10月は上旬にのみほとんど実施したので、これらの月別平均値については5月下旬と10月上旬に限定して記述する。

3.1.1 Rn, IE, H, G, ET および R の季節変動

1983年から1992年までの月別平均のRn, IE, H, G, ET および R を図-2に示した。Rnは6月に最大値を示し、その後徐々に減少した。IEはRnと同様な変動を示した。HとGは5月下旬から10月上旬までほぼ減少し、Gは9月以降は負の値となった。IEのRnに対する比は5月下旬の57%から9月の71%まで増加傾向を示した。これは後述のように、土壌水分が経時的に増加したことも一要因と考えられる。

ETは5月下旬、6月および7月に 3mm d^{-1} 以上で、6月に最大値 3.6mm d^{-1} を示したが、その後減少し9月および10月上旬には 2mm d^{-1} 弱であった。5月下旬と6月にETはRよりも大きく、7月にはほぼ等しかった。しかし、8月から10月上旬までETはRよりも小さく

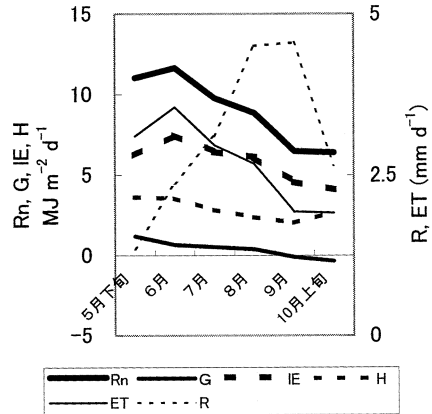


図-2 熱収支項 (Rn, G, IE, H), 蒸発散量 (ET) 及び降雨量 (R) の月別平均値の推移 (1983-1992)

Fig. 2 Monthly averages of heat balance components (Rn, G, IE, H), evapotranspiration (ET) and rainfall (R) (1983-1992).



図-1 熱収支項 (Rn, G, IE, H), 地温及び土壌水分張力の測定日 (白地の部分)

Fig. 1 Measurement date of heat balance components (Rn, G, IE, H), soil temperatures, and soil water suction (white portion).

なった。したがって、5月下旬と6月に作物生育のための土壌水分は減少あるいは不足し、一方、8月から10月上旬まで増加あるいは過剰であることが推測された。

3.1.2 土壌水分の季節変動

1983年～1991年までの土壌水分張力が -31.2 kPa (pF値で2.5)以下の日数割合を図-3に示した(15cmの値は5cmの値と近似するため省略)。5月下旬の深さ5, 15, 25cmの値は36～38%であったが、深さ35cmの値は17%, 深さ45cmの値は0%であった。播種あるいは移植直後であるこの時の作物の根群域は浅いので、土壌水分は不足していたと考えられる。6月での深さ5, 15, 25, 35cmの値は42%から58%で、深さ45cmでは27%であった。したがって、6月も土壌水分は不足していた。7月と8月の5深度の値は23%から31%であり、5月下旬および6月に比べ土壌の乾燥は緩和されてきた。これら結果は上記3.1.1でのETとRの関係(5月下旬と6月に、作物生育のための土壌水分は減少あるいは不足)を裏付けるものである。

3.1.3 地温の季節変動

1983年から1992年までの月別平均地温を図-4に示した。5月下旬の地温は深さ1cmで 15°C 、50cmで 10°C であり、各深度での地温は5月下旬から8月にかけて上昇し、 $17\sim 20^{\circ}\text{C}$ の範囲であった。この間、深度が浅いほど地温は高かった。作土が乾燥している5月下旬と6月の深さ1cmと50cmの地温差(勾配)は7月や8月よりも大きかった。9月から各深度の地温は低下し始め、10月上旬には深度が浅いほど低くなり、深さ1cmで 11°C 、深さ50cmで 13°C となった。したがって、観測されなかった非農耕期(春先)に、深さ1cmと50cmでの地温の逆転が発生したと考えられる。

3.2 晴天日での熱収支と地温の日変化

3.2.1 5月下旬での熱収支と地温

5月下旬(1986年5月26, 28日)における熱収支と地温の変化を図-5に示した。これはテンサイの苗移植後約1月であり植被率は小さかった時点で、両日の土壌水分張力はほぼ等しく、土壌は湿潤であった。26日の日中のRn(正值の合計(以下同じ): $22.3\text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)は28日($20.1\text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)とほぼ等しく、両日ともに日中のRnの約50%がIEに配分された。Gへの配分割合は26日で10%であるが、28日は20%であった。これは28日の日平均気温が26日より約 3°C 高いことが一要因であろう。気温の日較差は28日で26日より大きかった。

3.2.2 6月上旬の土壌の乾燥時と湿潤時における熱収支と地温の比較

土壌が湿潤な1988年6月6日(以下、6月湿潤日という)と比較的乾燥していた1990年6月6日(以下、6月

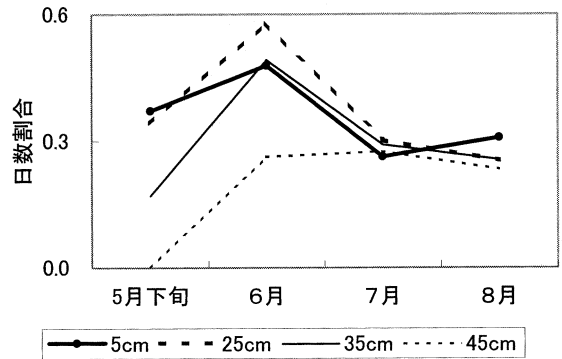


図-3 土壌水分張力が -31.2 kPa以下の日数割合(1983-1991)

Fig. 3 Percentages of days on which the soil water suction was below -31.2 kPa.

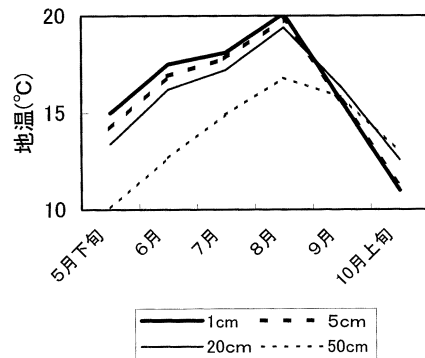


図-4 地温(深さ1cm, 5cm, 20cm, 50cm)の月別平均値の推移(1983-1992)

Fig. 4 Monthly averages of soil temperatures at depths of 1, 5, 20 and 50 cm.

乾燥日という)での熱収支と地温の日変化を図-6に示した。両日とも作物(小豆と菜豆)は小さかった。

日中のRnは6月湿潤日と6月乾燥日(それぞれ $19.3, 20.4\text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)でほぼ等しいが、日中RnのIEおよびHへの配分割合は6月乾燥日(IE: 52%, H: 42%)で6月湿潤日(IE: 47%, H: 38%)よりも大きかった。一方、Gへの配分割合は6月湿潤日において15%で、6月乾燥日の約6%より大きかった。6月湿潤日の日平均気温は約 17°C で、6月乾燥日より 6°C 高かった。気温の日較差は6月湿潤日で6月乾燥日より 1°C 大きかった。

3.2.3 7月上旬の土壌の乾燥時と湿潤時における熱収支と地温の比較

土壌が湿潤な1985年7月3日(以下、湿潤日という)

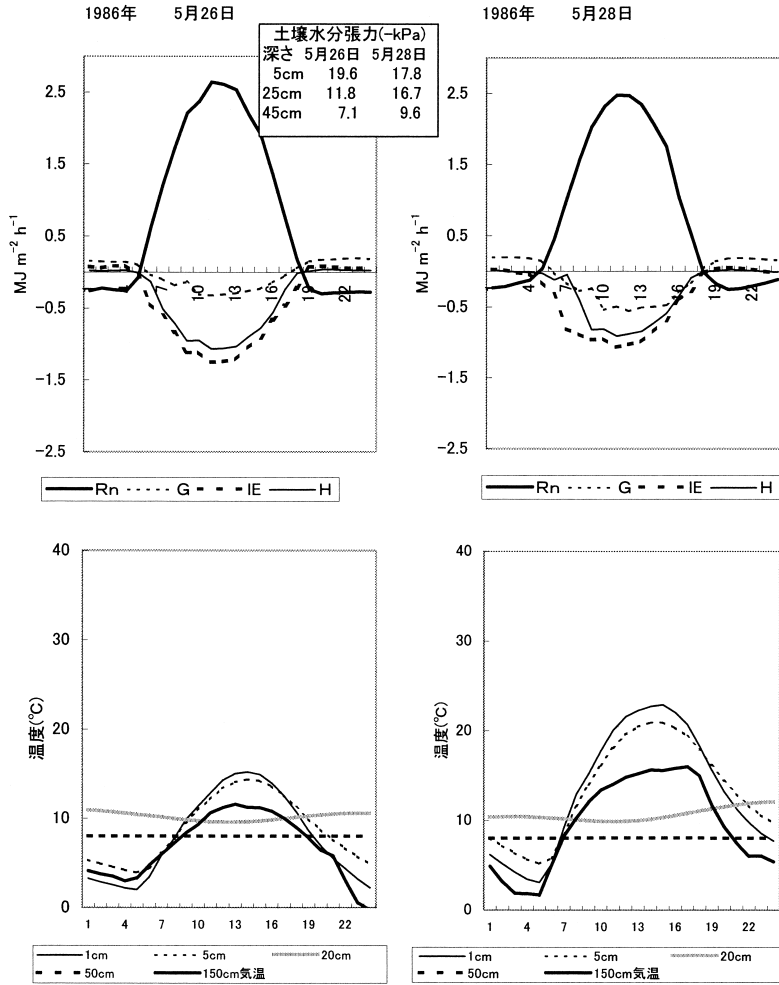


図-5 5月下旬の晴天日における熱収支項と地温の日変化

Fig. 5 Changes in heat balance components and soil temperatures on late May sunny days.

と乾燥していた1990年7月2日（以下、乾燥日という）での熱収支と地温の日変化を図-7に示した。1985年の作付けは小豆で、7月1日の草丈は3.1 cm、葉数は1.0、1990年の作付けは菜豆で、7月1日の草丈は5.8 cm、葉数は0.9（十勝中部農業改良普及センター、1996）で、両日の植被率は低いと考えられた。

日中のRnは湿潤日と乾燥日（各々、21.1、22.0 MJm⁻² d⁻¹）ではほぼ等しかった。湿潤日ではRnの79%がIEに分配され、Hへの配分割合は9%であった。一方、乾燥日ではRnの52%しかIEに配分されず、42%がHに配分された。これらの事は土壌水分不足のため、乾燥している土壌では蒸発散が抑制されるとともに、Hへの割合が増加することを示している。湿潤日でのRnのGへの

配分率（12%）は乾燥日（6%）よりも大きかった。

日平均気温は湿潤日で乾燥日より約2°C高かった。湿潤日では多量の蒸発潜熱により表層（深さ1cm）地温の上昇が抑制される一方で、表層が湿潤なため、温度拡散率も大きく、表層より下部（深さ5cm）の温度も日中には乾燥日に比べ上昇した。反対に、乾燥日には表層地温だけが36°Cにも上昇するが、この土層が断熱効果を示し表層より下部の温度は上昇し難い（たとえば、片岡恭子ら、1998）。

高緯度地域での農業にとって、特に生育初期に地温を上昇させることは大きな課題であり、地表面傾斜の方位や角度あるいは土色の、熱収支と地温に及ぼす影響が検討されている（Radka,1982；Sharratt *et al.*, 1992；Sharratt

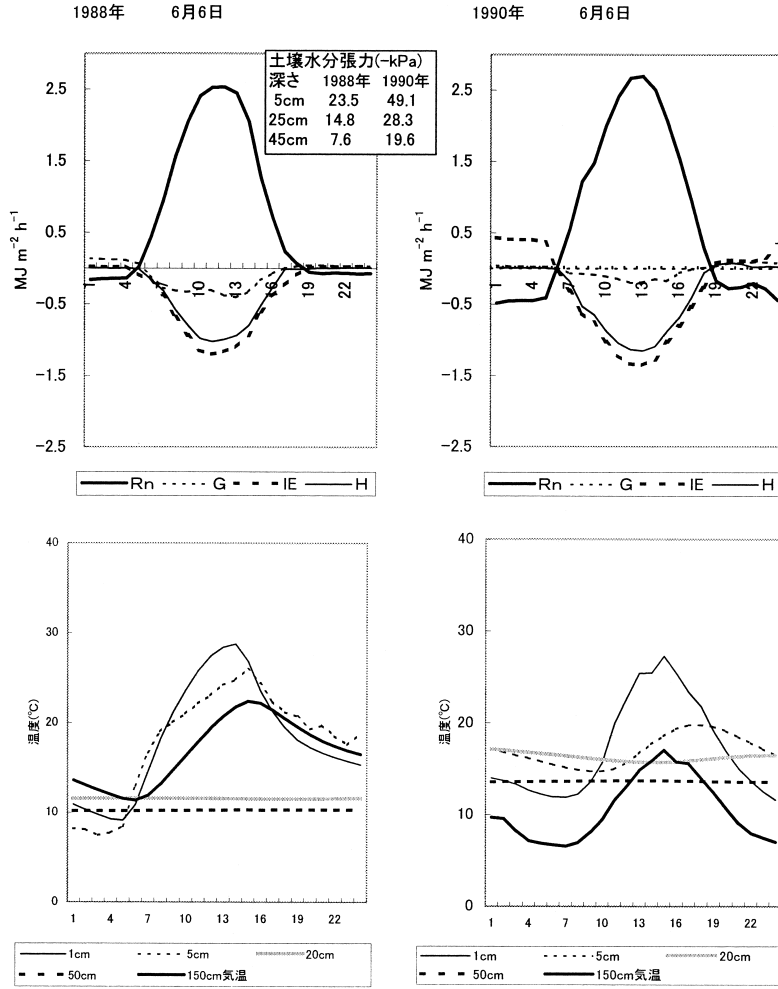


図-6 6月上旬の土壌が湿潤な時と乾燥した時の晴天日での熱収支項と地温の日変化

Fig. 6 Changes in heat balance components and soil temperatures with wet and dry soil on early June sunny days.

and Campbell, 1994 ; Sharratt and Flerchinger, 1995 ; Sharratt, 1996) が、本地域では土壌水分の地温変化に及ぼす影響も熱収支との関係でさらに検討すべきである。

3.3 地温差と地中熱流量の関係

旬別平均の深さ1cmと50cm間の日地温差と旬別平均の日地中熱流量の関係を図-8に示した。両者には有意な相関が認められる。深さ1cmと50cmの月別平均の地温の差は春～初夏(5月下旬から6月)にかけて大きい(図-4)。また、この時期に作土(深さ25cm)は乾燥もしている(図-3)。したがって、表層以下の地温上昇が抑制されていることも考えられる。このため、畑地かんがいをを行うと温度拡散率が増大し、地温上昇の可能性が考えられる。しかし、低温なかんがい水の施用散布は地

温を低下させることが懸念されている。かんがい水温が地温より低いと、地温が低下し、作土の地温上昇が抑制される(P.J. Wierenga et al., 1970)ことも考えられる。これらの解明についても、今後の検討課題である。

4. おわりに

北海道十勝支庁中札内村の畑圃場で作付け期間中の熱収支、地温及び土壌水分張力を10カ年にわたり観測し、5月下旬と6月に土壌水分が不足し、8月から10月にかけて余剰が生じていると考えられた。また、7月上旬での土壌が乾燥した晴天日には日中の表層のみの地温上昇が顕著であった。

春先の畑地かんがいにより地温の低下あるいは上昇抑

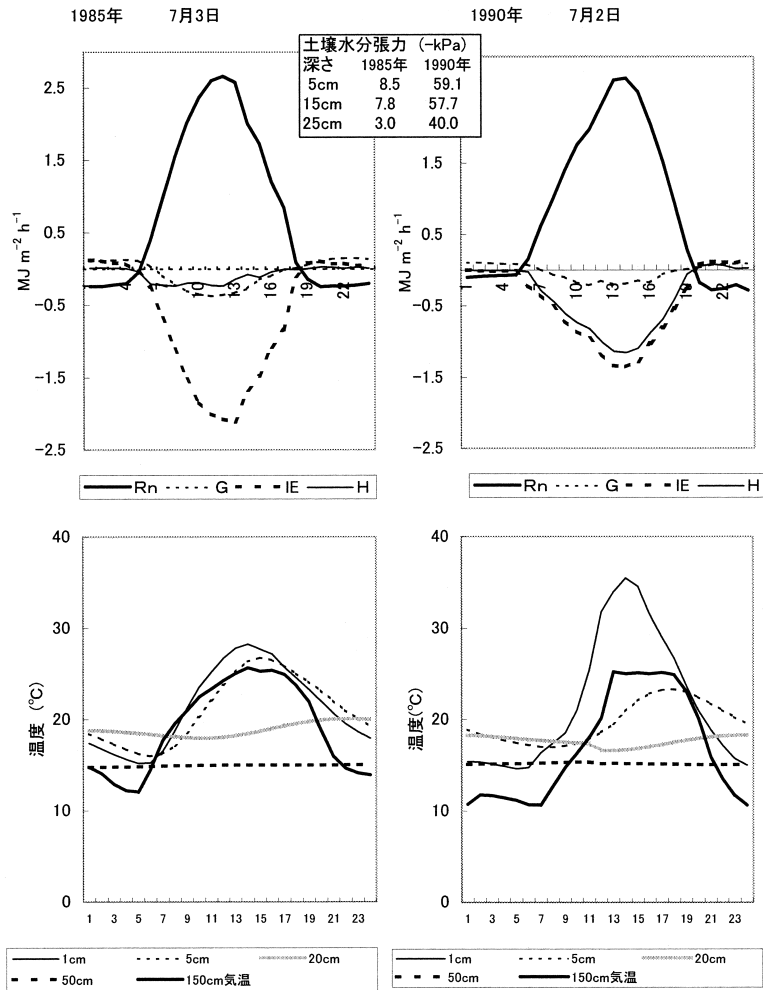


図-7 7月上旬の土壌が湿潤な時と乾燥した時の晴天日での熱収支項と地温の日変化
 Fig. 7 Changes in heat balance components and soil temperatures with wet and dry soil on early July sunny days.

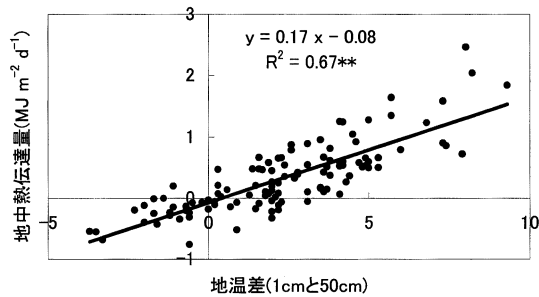


図-8 旬別平均の地中熱流量と深さ1cmと50cmの地温差の関係
 **: 1%水準で有意

Fig. 8 Relation between the ten day average of soil heat flux and the ten day average of soil temperature difference between 1 cm and 50 cm depth.

制が懸念されている。しかし、条件によっては土壌湿潤時の方が表層のみでなく、作土全体の地温上昇が促進される可能性があり、今後この検討が必要であろう。

謝 辞

本報告の作成に当り、貴重なご教示やご指摘を頂いた農業工学研究所福本昌人博士、北海道農業研究センター広田知良博士及び作況調査資料を提供頂いた北海道農政部山神正弘参事に深謝します。

引用文献

Ishiwata, T. and Kobayashi, N. (1995) : The water and heat balance of farmland in Nakasatsunai, in "Soil moisture control in arid and semi-arid region for agroforestry (Anase, N. and Yasutomi, R. eds) pp. 205-212, Tokyo University of Agriculture Press, Tokyo.

片岡恭子・塩沢 昌・多田 敦 (1998) : 筑波関東ロームにおける地温の日変化と乾燥層を通した蒸発一裸地地温の日変化と土壌水分量の関係 (I) 一. 農土論集, **194** : 115-124.

Radka, J.K. (1982) : Managing early season soil temperature in the northern corn belt using configured soil surfaces and mulches. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46** : 1067-1071.

佐久間敏雄・小林信也・吉田 享 (1975) : 畑地におけ

る水分および熱の動態 (第1報) 牧草畑の熱収支と蒸発散量. *土肥誌*, **46** : 507-513.

- Sharratt, B.S. (1996) : Soil temperature, water content, and barley development of level vs. ridged subarctic seedbeds. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60** : 258-263.
- Sharratt, B.S. and Flerchinger, G.N. (1995) : Straw color for altering soil temperature and heat flux in the subarctic. *Agron. J.*, **87** : 814-819.
- Sharratt, B.S. and Campbell, G.S. (1994) : Radiation balance of a soil-straw surface modified by straw color. *Agron. J.*, **86** : 200-203.
- Sharratt, B.S., Schwarzer, M.J., Campbell, G.S. and Papendick, R.I. (1992) : Radiation balance of a ridge-tillage with modeling strategies for slope and aspect in the subarctic. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **56** : 1379-1384.
- 内嶋善兵衛 (1982) : 農林・水産と気象, 気象の利用と改良. p. 35, 朝倉書店, 東京.
- (財)日本気象協会北海道本部 (1992) : 北海道の気象 1991年版. p. 38, 札幌.
- Wierenga, P.J., Hagen, R.M. and Nielsen, D.R. (1970) : Soil temperature profiles during infiltration and redistribution of cool and warm irrigation water. *Water Resource Research*, **6**, 230-238.

受稿年月日 : 2002年7月9日

受理年月日 : 2003年3月5日